

Trabajo de Final de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO
TERCIARIO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA
TEXTIL BASADO EN LA ADSORCIÓN DE
COLORANTES**

MEMORIA

Autor: Eugenia Aymat
Director: Vicenç Martí
Convocatòria: Enero 2017



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUMEN

La industria textil es uno de los grandes contribuyentes en la contaminación del medio ambiente, este trabajo se centra en los adsorbentes, ya que la utilización de estos ofrece buenos rendimientos en la eliminación de colorantes, pero puede presentar un coste elevado. El proyecto estudia las alternativas de adsorción frente a un caso de estudio del colorante azul de metileno y se realiza el diseño del tratamiento terciario final.

Primeramente se estudiaron las características principales de la adsorción como sus tipos, el proceso, la capacidad de adsorción y las isothermas, una vez adquiridos todos los conocimientos, se procedió a seleccionar el caso de estudio. Una vez seleccionado un caso de estudio, se estudiaron dos carbonos activos de bajo coste creados a través de materias primas diferentes al carbón activo comercial.

Se estudia como afectan estos dos tipos de adsorbentes al mismo caso de estudio con un solo colorante y se diseña el tratamiento terciario a través del proceso Batch y proceso continuo y se decide por un lado cual es el carbón activo más beneficioso y el diseño del sistema final.

Finalmente, ver como influye en el diseño la incorporación de un nuevo colorante.

ÍNDICE

RESUMEN	2
ÍNDICE	3
1. GLOSARIO	4
2. PREFACIO	5
2.1 Origen	5
2.2 Motivación	6
3. INTRODUCCIÓN	7
3.1 Objetivos	8
3.2 Alcance	8
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
4.1 Contaminantes principales de la industria textil	9
4.2 Clasificación de Colorantes y pigmentos	10
4.3 Adsorción	11
4.3.1 Aplicaciones de adsorción	12
4.3.2 Tipos de adsorbentes	12
4.3.3 Proceso de adsorción	14
4.3.4 Desarrollo de las isothermas de adsorción	15
4.3.5 Adsorción Batch	17
4.3.6 Adsorción en continuo	19
5. CASO DE ESTUDIO	24
5.1 Hipótesis	24
5.2 Azul de metileno	25
5.3 Carbonos activos de bajo coste	26
5.4 Carbón activo de estudio 1	27
5.4.1 Métodos de preparación del carbón activo	27
5.4.2 Experimentación	28
5.5 Carbón activo de estudio 2	28
5.5.1 Métodos de preparación del carbón activo	29
5.5.2 Experimentación	29
6. DISEÑO DEL TRATAMIENTO TERCIARIO	31
6.1 Constantes de las isothermas	31
6.2 Depósito pulmón	32
6.3 Diseño Batch	33
6.3.1 Cálculos Batch	34
6.3.2 Diseño de depósito Batch	37
6.4 Diseño en continuo	39
6.4.1 Diseño de contactor en continuo	40
6.5 Comparación de ambos modelos y ambos casos de estudio	45
6.6 Modelo competitivo para contactores continuos	46
7. PLANIFICACIÓN Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	51
7.1 Cronograma de actividades del proyecto	51
7.2 Bienes materiales	51
7.3 Recursos humanos	52
7.4 Costes totales	52
8. CONCLUSIONES	53
9. AGRADECIMIENTOS	54
10. BIBLIOGRAFÍA	55

1. GLOSARIO

a	Constante empírica	-
a ₁	Constante empírica del componente 1	-
a ₂	Constante empírica del componente 2	-
b	Constante empírica	-
b ₁	Constante empírica del componente 1	-
b ₂	Constante empírica del componente 2	-
bed life	Tiempo de residencia	días
C ₀	Concentración inicial del adsorbato	mg/L
C _e	Concentración final del adsorbato en el equilibrio	mg/L
C _{e1}	Concentración final del adsorbato en el equilibrio componente 1	mg/L
C _{e2}	Concentración final del adsorbato en el equilibrio componente 2	mg/L
EBCT	Tiempo de contacto de lecho en vacío	h
K _f	Factor de capacidad de Freundlich	(mg/g)(L/mg) ^{1/n}
M	Masa del adsorbente	g
m _{ca}	Masa de carbón activo	g
m/Q _t	Ratio de carbón activo	g/L
Q	Caudal	m ³
Q ₁	Caudal de entrada	m ³
Q ₂	Caudal de salida	m ³
q _{e1}	Concentración de adsorbente después del equilibrio	mg/g
t	Tiempo	h
t ₁	Tiempo de carga Q ₁	h
t ₂	Tiempo de carga Q ₂	h
V	Volumen del líquido en el reactor	L
V _b	Volumen del contactor ocupado por el carbón activo	m ³
x/m	Concentración de adsorbente después del equilibrio	mg/g
1/n	Factor de intensidad de Freundlich	-

2. PREFACIO

2.1 Origen

A medida que los efectos negativos que la moda y la industria textil tienen sobre el medioambiente y las personas fueron ganando conocimiento público, comenzó a revelarse también la magnitud del problema y la complejidad de las soluciones.

La industria textil es uno de los grandes contribuyentes en la contaminación del medio ambiente.[13] En los procesos de fabricación de telas, hilos y ropa, se utilizan gran cantidad de químicos y reactivos que si no se tratan adecuadamente puede provocar un gran impacto en el aire y aguas cercanas a las plantas de producción.

Esto supone un grave problema ambiental, debido a que pocas son las industrias, situadas sobretudo en países emergentes, que se encargan de depurar sus aguas residuales, o de controlar los gases sobrantes, vertiéndose directamente agua sin tratar a los ríos o gases al ambiente. Estos se incorporan a la cadena alimentaria y se filtran a los suelos y acuíferos subterráneos.

Según un informe de Greenpeace, varias empresas chinas que provee de material a marcas tan conocidas como Nike, Adidas, Puma y otras, está realizando vertidos de sustancias químicas y otros materiales tóxicos a la red de alcantarillado público. La organización ecologista pide a estas empresas que exijan el inmediato cese de estas actividades contra el medio ambiente y, de no cumplirse, cesen en sus negocios con dicha empresa.[14]

La industria textil, es uno de los mayores contaminantes a nivel global. Las exportaciones chinas de prendas de vestir representan el 30% de la mundial y unas 50 marcas de moda muy importantes, incluyendo a H&M, Adidas, Nike, Victoria's Secret, y Zara, tienen vínculos con fábricas en China que no respetan las leyes ambientales.

Es necesario pues, en el proceso de la fabricación, tener ciertos cuidados y tomar medidas que ayuden a disminuir el impacto de esta industria sobre el ambiente.

2.2 Motivación

Desde que tengo uso de razón, mi madre me ha transmitido la pasión que siente por la moda. Siempre ha sido un mundo muy cercano a mí, el cual me ha producido mucho interés. Por otro lado buscaba un tema actual y de carácter interesante relacionado con el tema industrial.

Al observar y conocer más profundamente el sector de la industria textil me di cuenta de la problemática asociada a esta y me pareció interesante su estudio y su posterior solución y diseño.

3. INTRODUCCIÓN

En la industria hay un gran abanico de procesos donde se generan una gran cantidad de foco de emisión de residuos sólidos, líquidos o gaseosos en la atmosfera.

En los diversos sectores industriales donde se generan restos contaminantes, el compromiso medioambiental se basa en la regulación de un límite sobre la emisión de contaminación específico de cada territorio.

La historia de Cataluña siempre ha ido acompañada de una creciente y fuerte industrialización del sector textil. Esta industria química ha tenido una gran repercusión mediática con los grupos activistas y el medioambiente, ya que este tipo de industrias se situaban a la vera de los ríos donde, usualmente, se producían todo tipo de vertidos no controlados de sustancias químicas potencialmente tóxicas bioacumulables y poco biodegradables.

Al generar grandes cantidades de aguas residuales, es necesario eliminar los colorantes en este tipo de efluentes dado el negativo impacto que genera en el medio ambiente, debido a las propiedades que poseen. Los colorantes resultan dañinos para los ecosistemas si son vertidos una vez aplicada la depuración clásica mediante tratamientos primarios y secundarios[1].

El sector textil precisa de tratamientos primarios, secundarios y tratamientos avanzados para eliminar la materia orgánica, sólidos no eliminados anteriormente y el color. En especial, la eliminación de los colorantes en este tipo de efluentes representa un reto tecnológico en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Se estima que mundialmente se descargan 280.000 toneladas de colorantes en los efluentes textiles[2]. La compleja mezcla de colorantes y compuestos que se emplean para el acabado, hace que las aguas residuales de la industria textil sean difíciles de tratar sólo por medio de sistemas biológicos o fisicoquímicos convencionales, por lo que se requieren estudios de tecnologías innovadoras para completar la depuración[3].

En todo caso, una reducción importante del color después de un proceso biológico únicamente es posible si se aplican tratamientos terciarios bastante costosos.

Existe un número importante de técnicas específicas destinadas a la eliminación del color de las aguas residuales. De todas ellas, las que más ampliamente se han

utilizado en la industria textil hasta el momento es el proceso de adsorción con carbón activo

3.1 Objetivos

El objetivo de este trabajo se centra en el diseño de un sistema de tratamiento terciario basado en la adsorción de colorantes. Su objetivo principal es conocer las características de la adsorción: tipos de adsorbentes, como se efectúa el proceso, desarrollar sus isothermas características, el proceso Batch y el proceso continuo, para posteriormente poder aplicarlo a un caso de estudio en concreto.

Estudiar como afectan dos tipos de adsorbentes procedentes de materias primas diferentes al mismo caso de estudio con un solo colorante. Diseñar el tratamiento terciario a través del proceso Batch y proceso continuo, decidir cual es el carbón activo más beneficioso y el diseño del sistema final.

Finalmente, ver como influye en el diseño la incorporación de un nuevo colorante a través de la relación entre parámetros.

3.2 Alcance

El alcance del proyecto, se basa en el estudio de la industria textil y su problemática ambiental debido a la existencia de colorantes en los efluentes. Los procesos de limpieza y extracción de colorantes es sumamente caro por la cantidad de carbón activo que se requieren. Por eso es importante en invertir en el desarrollo de utilización de nuevas materias primas para la generación de nuevos carbonos activos más baratos, para que haya una implantación en países con poco desarrollo y para que les sea más fácil la eliminación de colorantes.

En los siguientes apartados se estudiará el método de eliminación de colorantes basados en la adsorción.

Se efectuará una comparativa de dos carbonos activos procedentes de materias primas diferentes y de dos técnicas de procesos de adsorción, el Batch y el continuo. como afectan a un caso de estudio en concreto, para así poder elegir y dimensionar tratamiento terciario.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Contaminantes principales de la industria textil

La industria textil es químicamente intensa, utilizando una gran cantidad de productos químicos, desde la tintura de tejidos, hasta las impresiones y los acabados. Como ya se ha mencionado anteriormente, las aguas residuales de estos procesos son tóxicas y pueden contaminar vías fluviales importantes. Estas peligrosas descargas pueden afectar negativamente a la salud humana, la fauna y el medio ambiente.[15]

CONTAMINANTE	USOS	EFFECTOS
Alquifenoles.	Procesos de lavado y teñido.	Disrupciones hormonales de carácter sexual.
Clorofenoles.	Biocidas.	Altamente tóxico, puede afectar tanto a seres humanos como a organismos acuáticos.
Ftalatos.	Ablandar plásticos.	Toxico para la reproducción de los mamíferos.
Retardantes de llama bromados y clorados. (sustancia peligrosa prioritario).	Reducir la inflamabilidad del producto.	Capaces de interferir en los sistemas hormonales implicados en el crecimiento y en el desarrollo.
Colorantes azoicos	Tinte.	Pueden causar cáncer al entrar en contacto con la piel.
Organoestánicos	Agente funguicidas.	Es bioacumulativo y que puede afectar a los sistemas inmunológico.
Perfluorados	Para ofrecer propiedades antiadherentes e hidrófugas.	Actúan como disruptores hormonales alterando los niveles de hormonas del crecimiento e involucradas en la reproducción.

Clorobencenos Metales pesados: Cd, Pb, Hg y Cr(VI)	Como disolventes y biocidas en la fabricación de tintes.	Afecciones al hígado, tiroides y sistema nervioso central.
	Tintes y pigmentos.	Estos metales pueden acumularse en el cuerpo a lo largo del tiempo y son altamente tóxicos, con efecto irreversible, incluyendo lesiones en el sistema nervioso.

Tabla. 4.1 Contaminantes principales de la industria textil

4.2 Clasificación de Colorantes y pigmentos

Los colorantes utilizados en la industria textil pueden primero dividirse en materias colorantes (materiales solubles) y pigmentos (materiales insolubles).

Un colorante es un compuesto orgánico que al aplicarlo a un sustrato generalmente una fibra textil pero también a cuero, papel, plástico o alimento, le confiere un color más o menos permanente. Un colorante se aplica en disolución o emulsión y el sustrato debe tener cierta afinidad para absorberlo.

Un pigmento, por el contrario, es una sustancia coloreada e insoluble que se dispersa en un medio adecuado para su uso. Se emplean principalmente para colorear plásticos y para pinturas y tintas de imprenta. El color aparece siempre como consecuencia de la acción conjunta de dos agrupaciones atómicas diferentes. El cromóforo¹ es por si solo el responsable del color.

Las moléculas que tienen un grupo cromóforo pueden actuar como colorantes. Los dos tipos de colorantes industriales más importantes son los azoicos y los antraquinónicos, aunque hay otros como los colorantes indólicos, de los cuales el más representativo es el índigo, de color azul, los colorantes de ftalocianina, como la

¹ Cuando una molécula absorbe ciertas longitudes de onda de luz visible y transmite o refleja otras, la molécula tiene un color. Un **cromóforo** es una región molecular donde la diferencia de energía entre dos orbitales moleculares cae dentro del rango del espectro visible.

ftalocianina de cobre de color turquesa muy resistente a la luz, y los derivados de triarilmetano.

Algunos colorantes representativos son:

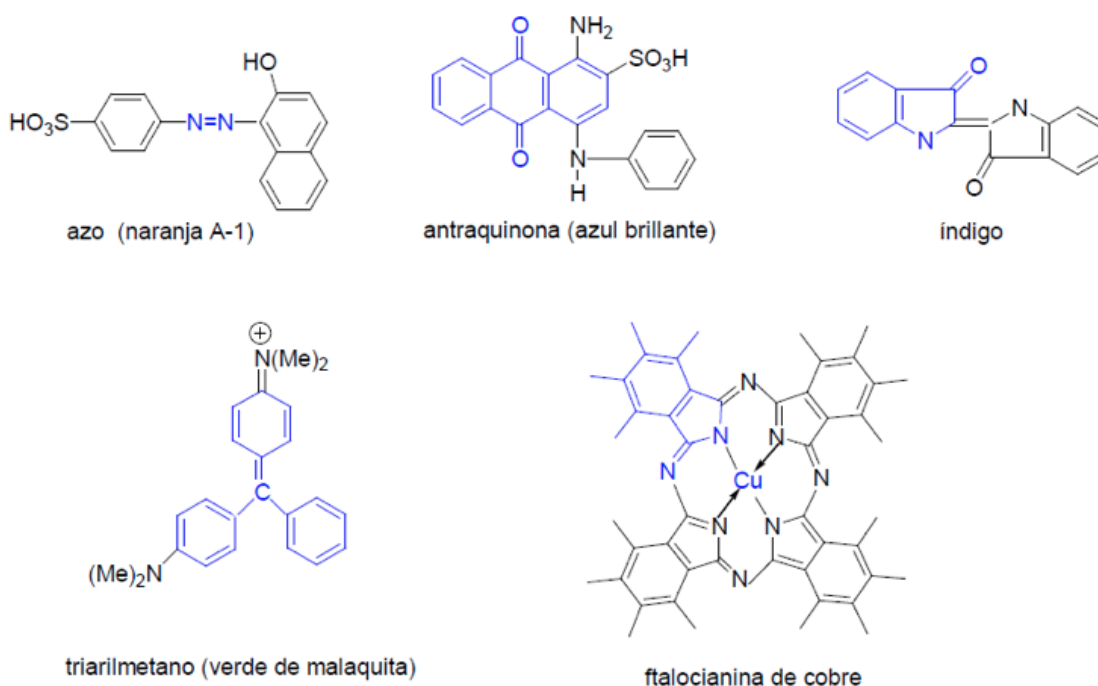


Figura. 4.2 Clasificación de colorantes representativos

La industria química ha desarrollado una amplia gama de colorantes sintéticos que permiten acceder a una gran diversidad de tonalidades. Para nombrar esta variedad de productos no se utiliza la nomenclatura sistemática sino un nombre comercial y un código numérico, que se encuentran registrados en el índice de Colores. Los colorantes están clasificados en diferentes volúmenes por su aplicación tintórea, su estructura química y su nombre comercial.

4.3 Adsorción

En el tratamiento de aguas, la adsorción se utiliza para la eliminación de las sustancias que se encuentran en disolución mediante la acumulación de dichas en una base sólida. La adsorción se considera una transferencia de masa de una fase líquida a una fase sólida. El adsorbato es la sustancia que se desea eliminar de la

forma líquida, mientras que el adsorbente es el sólido, líquido o gas donde se está acumulado el adsorbente.[4] El carbón activo es la principal adsorbente usado en este proceso de adsorción.

4.3.1 Aplicaciones de adsorción

La adsorción dentro del proceso de tratamiento de aguas residuales se utiliza para un agua que ya ha sido previamente manipulada mediante tratamientos biológicos previos como los del tratamiento primario y secundario. La adsorción se usa para la eliminación de componentes orgánicos y residuos de constituyentes inorgánicos como el nitrógeno, sulfidas y metales pesados entre otros, aunque también es utilizado para la extracción del mal olor que suelen producir las aguas contaminadas. Incluso, en algunos casos, el proceso de adsorción se utiliza para el control de formación de algunos tóxicos que se podría formar durante la depuración de aguas.

Es importante saber cuáles son los componentes que mejor y peor se eliminan con carbón activo, ya que se conoce que los que tienen un bajo peso molecular serán difíciles de ser eliminados con dicho reactivo que los que posean un alto peso atribuido al tamaño de dichas moléculas.[4]

4.3.2 Tipos de adsorbentes

El tratamiento mediante adsorbentes trata de hacer pasar el líquido por una capa de material adsorbente a modo de filtro dentro de un reactor específico para dicho proceso. No es necesario que sea un sólo tipo de adsorbente, también se pueden encontrar mezclas de adsorbentes. Una vez finalizada esta técnica es necesario un proceso posterior de sedimentación o bien un filtrado específico para poder eliminar el adsorbente ya gastado.

Los principales tipos de adsorbente son el Carbón Activo, el Hidróxido de Hierro Granulado más conocido como GFH y la alúmina activada. Las bases que contienen como materia prima el carbón son las más utilizadas para los adsorbentes en los procesos de adsorción, dado que tienen un rendimiento alto cercanos al 95 %.

4.3.2.1 Carbón activo

El carbón activo se forma del sustento de un material de base orgánica. Mediante un proceso pirolítico se extraería la base, seguido de una activación de dicho material mediante la exposición a la oxidación de gases como vapor y dióxido de carbono a altas temperaturas[4]. El grosor de los poros se define cómo:

- Macroporos: poros de longitud mayor de 500nm.
- Mesoporos: poros de longitud entre 50nm y 20 nm.
- Microporos: poros de longitud menor a 20nm.

Aunque la clasificación es básica y es necesario conocerla, el tipo de carbón activo más utilizado es el carbón activo granulado o también llamado GAC, el cual tiene un diámetro mayor a 0,1 mm y que se usa mediante presión o filtración por granulado. Seguido en importancia del carbón activo en polvo o conocido como PAC con un diámetro típico de menos de 0.074 mm y que se añade directamente al fango para un proceso de adsorción mediante contacto.

El carbón activo es el más popular adsorbente y ha sido utilizado con un índice de éxito alto durante muchos años en tratamientos de potabilidad de tratamientos de aguas[4]. El uso del carbón activo es básicamente conocido por el hecho de eliminar contaminantes dentro del tratamiento de aguas de efluentes contaminados mediante el proceso de la adsorción.

La adsorción de colorantes a partir del carbón activo fue encontrada como la técnica más efectiva para reusar o quitar esos contaminantes tan peligroso de los efluentes contaminados.

4.3.2.2 Granulado de hidróxido férrico

En el granulado de hidróxido férrico su rendimiento y parámetros dependen básicamente de los parámetros de calidad que tenga el agua, cómo podría ser el PH, su temperatura etc. Los contaminantes que se pueden extraer más fácilmente utilizando este tipo de adsorbente incluyen el arsénico, el cromo, el selenio, el cobre entre otros metales. No se suele utilizar en sistemas que se consideren largos y en los procesos de regeneración se reduce mucho su capacidad de adsorción con lo que no es posible reutilizarlo simplemente es remplazado cuando este se gasta.

4.3.2.3 Alúmina activada

Se deriva de un mineral natural de la bauxita que se utiliza para el tratamiento depurativo de aguas por su estructura sumamente cristalina. Este activo es muy utilizado en procesos de aguas de uso doméstico. Este a contrario del granulado de hidróxido férrico sí que puede ser regenerado, aunque esto también suponga un coste adicional que se tiene que tener en cuenta en el proceso. Aunque tiene similitud con ella dado a que la temperatura y el PH del agua en el que se encuentra también afectara al rendimiento del proceso de adsorción en el que nos encontremos.

4.3.3 Proceso de adsorción

El proceso de adsorción tiene lugar en cuatro estados sumamente definidos. Transporte de la solución, difusión en zona intermedia, transporte de poros en la superficie y por último la adsorción.

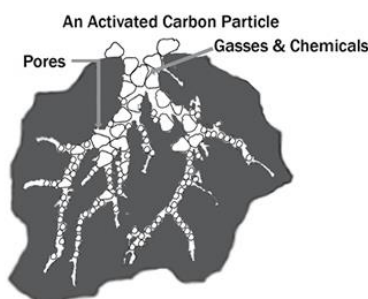


Figura. 4.3.3 Definición gráfica de la adsorción en una partícula de carbón activo

La adsorción puede acontecer en todas las capas de las superficies del carbón activo, desde las más superficiales hasta en las más internas, aunque se suele acumular más material en el interior de la partícula, dado que su superficie es mayor. Dado que el proceso de adsorción ocurre en una serie de pasos, cuando el ratio de adsorción equivale al de desorción se ha identificado el ratio limitante del carbón activo, se habrá llegado al equilibrio y a la capacidad máxima del adsorbente[4]. Se puede predecir la capacidad máxima de adsorción teórica para un contaminante concreto mediante las isotermas de adsorción.

4.3.4 Desarrollo de las isotermas de adsorción.

La cantidad de adsorbato que se podrá extraer mediante un adsorbente variará en función de diferentes parámetros, como la concentración del adsorbato que exista, la temperatura, la solubilidad, la estructura molecular, el peso molecular, la polaridad y saturación del hidrocarburo. Generalmente, la cantidad de material adsorbido se determina mediante función de la concertación a temperatura constante, y la función resultado es denominada isoterma de adsorción. Las isotermas de adsorción se desarrollan exponiendo una cierta cantidad de adsorbato en un volumen concreto de líquido mientras se varia la cantidad de carbón activo añadido a la muestra.

4.3.4.1 *Isoterma de Langmuir*

Ecuación utilizada para describir las isotermas experimentales desarrolladas por Langmuir. De todas las que existen, esta es la más utilizada para describir las características de adsorción del carbón activo usado en tratamiento de aguas residuales[5]. Se suponen hipótesis de temperatura constante, adsorción localizada, sólo en sitios definidos de la superficie. La superficie es homogénea y asumiendo que cada sitio de adsorción puede adherir sólo una molécula de adsorbato. La energía de adsorción es la misma para todos los sitios de adsorción. No existe interacción entre las molécula adsorbidas.

Derivada de consideraciones racionales, la isoterma de adsorción de Langmuir se define:

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e} = q_e \quad (\text{Ec. 4.3.4.1 - 1})$$

Donde : $\frac{x}{m}$ = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato / g adsorbente.

a, b = Constantes empíricas.

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción, mg/L.

La isoterma de adsorción de Langmuir se desarrolló asumiendo que había un número fijo de sitios accesibles en la superficie del adsorbente, los cuales todos tienen la misma energía, y que la adsorción es reversible. Se llega al equilibrio cuando el ratio de adsorción de las moléculas en la superficie es el mismo al ratio de desorción de las moléculas en la superficie, que es la diferencia entre la cantidad adsorbida en una

concentración particular y la cantidad que podría ser adsorbida en la concentración. En el equilibrio, esa diferencia es cero.

Las constantes de la isoterma de Langmuir pueden ser determinadas mediante $C_e / (x/m)$ versus C_e y haciendo uso de la fórmula lineal:

$$\frac{C_e}{\frac{x}{m}} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e \quad (\text{Ec. 4.3.4.1} - 2)$$

4.3.4.2 *Isoterma de Freundlich*

Ecuación utilizada para describir las isotermas experimentales desarrolladas por Freundlich. Se suponen hipótesis de temperatura constante, superficie rugosa y distribución exponencial de la energía de los sitios de adsorción[5].

La ecuación derivada empíricamente en 1912 de la isoterma de Freundlich es:

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \quad (\text{Ec. 4.3.4.2} - 1)$$

Donde : $\frac{x}{m}$ = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato / g adsorbente.

K_f = Factor de la capacidad de Freundlich , $(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$. Representa la cantidad de colorante o materia adsorbido por unidad de concentración en el equilibrio.

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción, mg/L.

$1/n$ = Factor de la intensidad de Freundlich. Representa la heterogeneidad de la superficie. Transformándose en más heterogéneo cuando este valor se aproxima al cero.

Las constantes en la ecuación de isoterma de Freundlich pueden determinarse mediante el logaritmo (x/m) versus el logaritmo de C_e y haciendo así la ecuación lineal escrita:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K_f + \log C_e \quad (\text{Ec. 4.3.4.2} - 2)$$

La variación en los factores de Freundlich para cada componente es enorme. Debido a esta variación, los factores de capacidades de Freundlich se tienen que determinar para cada nuevo componente.

4.3.4.3 *Modelo competitivo de la isoterma de Langmuir*

En el proceso de tratamiento de aguas se suelen encontrar mezclas o diferentes componentes orgánicos, eso produce una reducción en la capacidad del proceso de adsorción a nivel de componentes individuales en una solución con muchos componentes, aunque la capacidad del adsorbente total de la mezcla será mayor. Eso significa que el rendimiento se verá aumentado aunque pueda parecer lo contrario. La cantidad de inhibición en la competición de componentes está relacionado con el tamaño de las partículas adsorbidas, la afinidad de adsorción, y sus relativas concentraciones.[6]

$$q_{e1} = \frac{a_1 b_1 C_{e1}}{1 + b_1 C_{e1} + b_2 C_{e2}} \quad (\text{Ec. 4.3.4.3 – 1})$$

$$q_{e2} = \frac{a_2 b_2 C_{e2}}{1 + b_2 C_{e2} + b_1 C_{e1}} \quad (\text{Ec. 4.3.4.3 – 2})$$

Donde : q_{e1} = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato / g adsorbente.

a_1, b_1 = Constantes empíricas del componente 1.

b_2 = Constantes empíricas del componente 2.

C_{e1} = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción del componente 1, mg/L.

C_{e2} = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción del componente 2, mg/L.

4.3.5 Adsorción Batch

En el caso de proceso de adsorción Batch, ni el adsorbato ni el adsorbente fluyen, el ratio de adsorción del adsorbato se controla mediante el balance de masa.

El balance de masa se utiliza para reactores Batch y no es más que una reacción en el que se tiene que tener en cuenta cuanto carbón activo se ha añadido a la mezcla. El

resultado de dicha expresión en el equilibrio en el proceso de transferencia de masa es:

Balance de materia:

Cantidad de reactante adsorbido en el sistema = Cantidad inicial de reactante - Cantidad final de reactante.

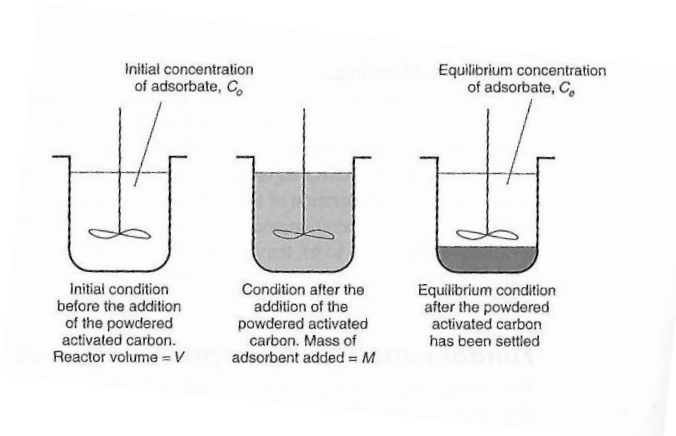


Figura. 4.3.5 Balance de masa de carbón en la adsorción

Enunciado simplificado:

Cantidad adsorbida= Cantidad inicial del adsorbato – Cantidad final del adsorbato presente.

3. Representación simbólica en el equilibrio:

$$q_e M = VC_0 - VC_e \quad (\text{Ec. 4.3.5 -1})$$

Donde : q_e = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato / g adsorbente.

M = Masa de asorbente, g.

V = Volumen de líquido en el reactor, L.

C_0 = Concentración inicial de adsorbato, mg/L.

C_e = Concentración final de la solución en el equilibrio de adsorbato después de la adsorción, mg/L.

También se puede escribir:

$$q_e = -\frac{V}{M} (C_e - C_0) \quad (\text{Ec. 4.3.5} - 2)$$

La capacidad de adsorción de un adsorbente se estima a través de los datos de las isothermas de adsorción[4]. La capacidad de adsorción del carbón puede ser estimada extendiendo una línea vertical desde el punto donde el eje horizontal corresponde a la concentración inicial C_0 , y su extrapolando la isoterma para que intersecte con esa línea. El valor en el punto de la intersección $[(x/m)]$ o q_e puede ser leído en el eje vertical y representa la cantidad de constituyente adsorbido por unidad de masa de carbón cuando el carbón activo está en el equilibrio con la concentración inicial del constituyente C_0 . El equilibrio generalmente aparece en la sección superior durante el tratamiento mediante columnas y representa la más alta capacidad del carbón para adsorber en un sistema de aguas concreto.

El proceso de adsorción tiene varias limitaciones asociadas, como el transporte de grandes volúmenes de material adsorbente, logística, las grandes áreas requeridas y la gran cantidad de adsorbente residual. El control y la monitorización de estos procesos son esenciales para una correcta utilización ya que el carbón activo afectará al pH, temperatura y caudal.

4.3.6 Adsorción en continuo

Cuando el agua residual fluye a través de una columna de carbón activo, los contaminantes se separarán gradualmente y el agua residual se va purificando progresivamente en un proceso de depuración continuo, diferente a los reactores batch que son un proceso discontinuo mediante balance de masas [4].

No hay separación neta entre el agua depurada y la de alimentación. Se forma una zona de transición en la cual la concentración de contaminante varía desde un máximo, al final de la zona, hasta prácticamente cero en la parte inicial de la misma. Esta zona es la porción activa de la columna, y se denomina zona de adsorción o de transferencia de masa o también denominado MTZ.

Una columna de adsorción carbón activo a la que se alimenta agua a tratar, con una concentración de soluto C_0 , (mg/l). Se desea reducir la concentración hasta un valor igual o inferior a C_e (mg/l). Al comienzo de la operación, la concentración del efluente

es menor que la concentración permisible C_e . Transcurrido un tiempo se alcanza la concentración C_e correspondiente al punto de ruptura.

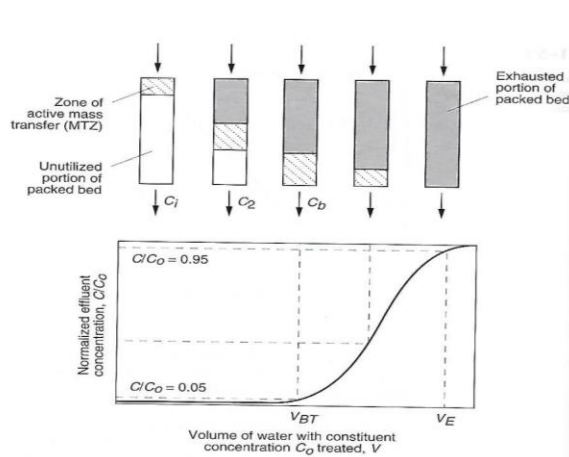


Figura. 4.3.6 – 1 Curva de ruptura típica para el carbón activo, mostrando la zona de transferencia de masa.

Como se puede observar en la figura 4.3.6-1, el lecho de carbón activo va saturándose hasta que llegado al máxima capacidad de adsorción.

El movimiento progresivo de esta zona de adsorción puede verse mediante la representación de las llamadas curvas de ruptura. Las ordenadas de una curva de ruptura corresponden a la concentración del efluente y las abscisas corresponden a la duración del flujo a través de la columna en tiempo.

Normalmente, la operación de una columna de adsorción no se prolonga hasta su agotamiento. Esta concentración se denomina concentración de ruptura C_e . Si la concentración del efluente alcanza el valor de ruptura y ésta corresponde a un tiempo de flujo de flujo que dista mucho del correspondiente a la concentración del soluto en el efluente, no resulta económico

Se evita este inconveniente utilizando varias columnas operando en serie, de forma que el efluente de una columna sea la alimentación de la siguiente. En un sistema bien diseñado, cuando la concentración del efluente de la última columna de la serie alcanza la de ruptura, el adsorbente de la primera columna se enviaría a la sección de regeneración y el afluente se aplicaría a la siguiente columna de la serie. Simultáneamente, una columna fresca, ya regenerada, se colocara a continuación de la columna para la cual se hubiese alcanzado la concentración de ruptura. De esta forma, la concentración final del efluente de la serie de columnas nunca superará la concentración de ruptura especificada C_e con siempre un valor continuo.

También pueden encontrarse las columnas en paralelo de esa manera todas van trabajando a la par, dividiéndose el caudal de entrada. Suele utilizarse esta practicas en aplicaciones industriales, donde los volúmenes a tratar son más grandes.

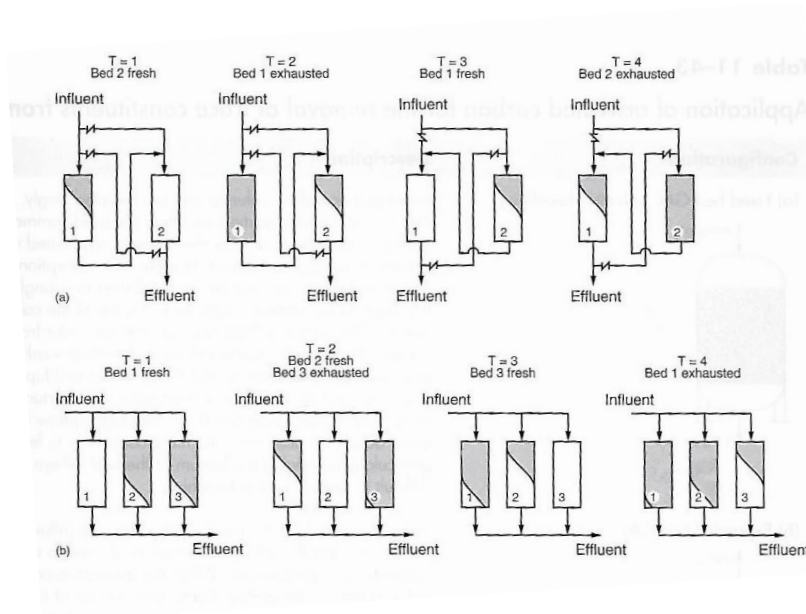


Fig. 4.3.6 - 2 Configuración de contactores de carbón activo. (a) serie y (b) paralelo.

4.3.6.1 Contactores de adsorción

Hay muchos tipos de contactores de carbón activo utilizados para eliminar componentes. Típicamente, se utilizan los contactores presurizados con flujo descendente mostrados en la figura siguiente.

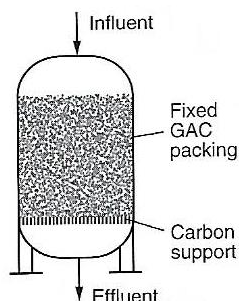


Fig. 4.3.6.1 - 1 Configuración de contactores de carbón activo. (a) serie y (b) paralelo.

El diseño y dimensionamiento de los contactores está basado en parámetros externos como el tiempo de contacto de lecho en vacío también llamado EBCT o el caudal de entrada de los efluentes.

En los contactores se crea un estado estable de balance de masa alrededor de el lecho de carbón activo del contactor que se puede transformar en:

Acumulación=Entrada – Salida – Cantidad adsorbida

$$0 = QC_0t - QC_e t - m_{ca}q_e \quad (\text{Ec. 4.3.6.1} - 1)$$

Donde : Q= tasa de flujo volumétrico, L/h.

C_0 =Concentración inicial del adsorbato, mg/L.

t= tiempo, h.

C_e =Concentración final del adsorbato en el equilibrio, mg/L.

m_{ca} =masa de adsorbente, g.

q_e = Concentración de adsorbente después del equilibrio, mg de adsorbato / g adsorbente.

De la ecuación 4.3.6.1-1, el ratio de uso del carbón activo se define como:

$$\frac{m_{ca}}{Qt} = \frac{C_0 - C_e}{q_e} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1} - 2)$$

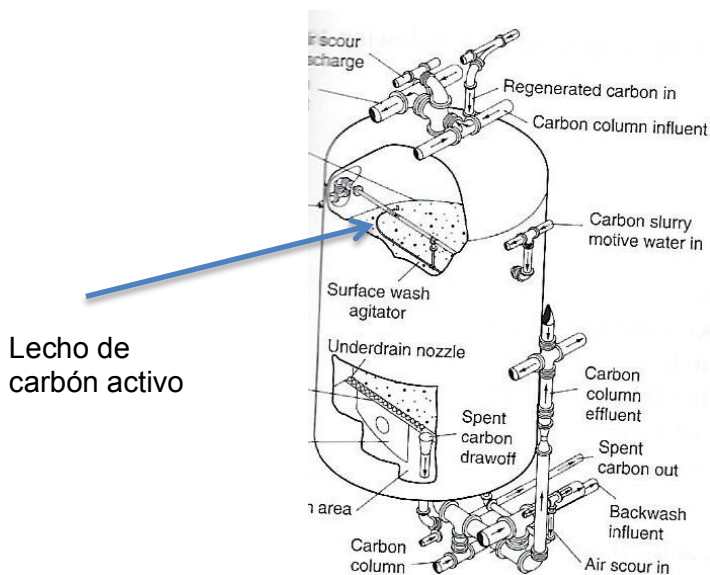


Fig. 4.3.6.1 - 2 Ilustración de un contactor presurizado continuo.

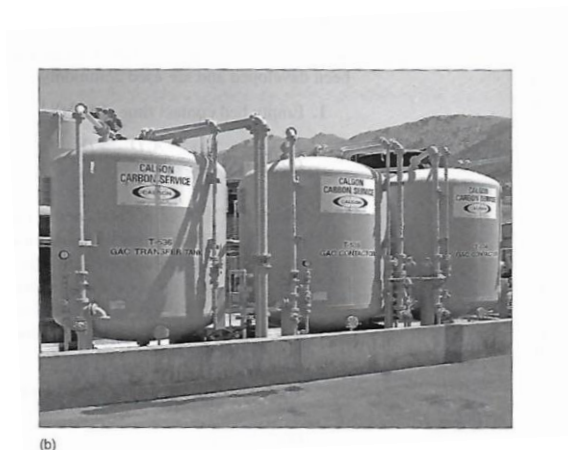


Fig. 4.3.6.1 - 3 Ilustración de contactores en paralelo.

Se asume que la masa de adsorbato en el espacio del poro es demasiado pequeña en comparación a la cantidad adsorbida, así pues el término $QC_e t$ en la ecuación 4.4.7-2 se puede despreciar y el ratio de adsorbente se puede simplificar:

$$\frac{m_{ca}}{Qt} \approx \frac{C_o}{q_e} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1 - 3})$$

La cantidad de operación del carbón activo en la operación de contactores y por lo tanto su dimensionamiento, se basa en el desarrollo del tiempo de lecho en vacío (EBCT):

$$EBCT = \frac{V_b}{Q} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1 - 4})$$

Donde: EBCT= empty bed contact life, h.

V_b =Volumen del contactor ocupado por el carbón activo, m^3 .

Q =caudal continuo, m^3/h .

Es importante también conocer el tiempo de residencia (bed life), o el tiempo que será efectivo ese carbón activo antes de reponerlo.

$$bed\ life = \frac{\text{Volumen de agua tratada para EBCT}}{Q} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1 - 5})$$

Donde : Volumen tratado para EBCT, L.

Q = caudal de entrada, L/día.

5. CASO DE ESTUDIO

En un principio se intentó buscar datos de una industria textil real. No se han podido encontrar datos de ninguna industria para poder extraer los colorantes de los datos y poder hacer un estudio de los gastos de carbón activo y los vertidos debido a la protección de datos.

Así pues, se decidió plantear un caso de estudio, con un colorante en particular y una concentración inicial concreta y considerarlos siempre constantes y ver la reacción ante diferentes tipos de carbón activo realizados a partir de materias primas distintas. La comparación se efectuará frente a unos casos donde se consideraran estas condiciones de concentración y colorante constantes.

El colorante seleccionado en el caso de estudio es el azul de metileno, o también denominado azul básico 9. Es un colorante muy habitual en muchas industrias textiles y por eso se ha considerado como correcto utilizar este colorante, dado que así se puede hacer una similitud a una industria textil real.

La concentración inicial a considerar siempre constante es de 100 mg/L de C_0 . Se consideró este valor inicial después de la observación de muchos datos y comparación de diferentes fuentes de información. Es una concentración considerada alta, así pues se puede aproximar al de una industria real.

La concentración final a llegar es de 10 mg/L de C_e , es decir, que al el tratamiento terciario tenga un rendimiento de 90%. Generando un caudal de 27 m³ / h de aguas residuales considerando que la industria de nuestro caso de estudio funciona 16 horas diarias.

Para el desarrollo del trabajo se decidió considerar dos estudios de dos carbonos activos diferentes utilizando el mismo colorante. Extraer sus datos y realizar una buena base de antecedentes y de información fue primordial.

5.1 Hipótesis

A la hora de plantear el caso de estudio se consideraron una serie de simplificaciones con el fin de reducir el grado de complejidad del sistema. Todas las hipótesis se mantendrán constantes a lo largo de todo el estudio.

- El efluente de colorante está a una temperatura de 298K.
- Solo se considera que el efluente tiene un colorante hasta que se llegue al estudio de competitividad entre colorantes.
- La concentración de colorante inicial del caso de estudio se considera constante, regular e igual a C_0 de 100 mg/L.
- El colorante aplicado al caso de estudio se considerará igual que los colorantes de los casos de estudio 1 y 2.
- El PH del caso de estudio se mantendrá constante y con un valor de 7.
- Minimización de las interferencias externas que pueden existir del agua o del entorno.
- Caudal constante de 27 m³ / h funcionando 16 horas diarias.

5.2 Azul de metileno

El azul de metileno, también conocido como azul básico 9 o por su formulación química 3- amino- 7- dimetilamino- 2- metilfenazationio, pertenece al grupo de colorantes catiónicos usado para colorear papel, algodón madera e incluso como colorante para el pelo. El azul de metileno también se utiliza en áreas como en la industria de la medicina o en la química. A temperatura ambiente, el azul de metileno se presenta como cristales o polvo cristalino y es de un color verde oscuro, con brillo bronceado y en disolución en agua, produce una solución azul.

Este colorante catiónico es muy utilizado en la industria textil y causa graves peligros a los humanos y a los animales en sus ojos y piel. Por eso es importante que no haya vertidos de estos colorantes al medio ambiente, ya que pueden afectar a la salud de las personas y animales y afectar al entorno ambiental[7].

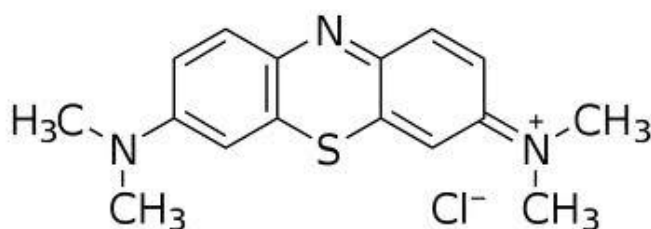


Fig. 5.2 Estructura molecular del azul de metileno, fórmula química $C_{16}H_{18}ClN_3S$ y peso molecular 319,85 g/mol.

5.3 Carbonos activos de bajo coste

El carbón activo es el más popular adsorbente y ha sido utilizado con un índice de éxito alto durante muchos años en tratamientos de potabilidad de tratamientos de aguas[8]. El uso del carbón activo es básicamente conocido por el hecho de eliminar contaminantes dentro del tratamiento de aguas de efluentes contaminados mediante el proceso de la adsorción.

Aunque vale la pena comentar que el carbón activo comercial es muy caro. En los años próximos se ha prestado mucha atención en la preparación de carbón activo de algunos productos agrícolas.

Algunos de estos ejemplos es la investigación de producción de carbón activo con productos naturales con piñones de oliva, arroz etc.. Las ventajas de utilizar productos no costosos como materia prima es que son potencialmente menos costoso de producir, manufacturar y trabajar con ellos, ya que vienen de recursos naturales. La adsorción de colorantes a partir del carbón activo fue encontrada como la técnica más efectiva para reusar o quitar esos contaminantes tan peligrosos de los efluentes contaminados.

Las características con las que vaya a funcionar el carbón activo dependen sumamente de las características del carbón activo que se utilice, también del tipo de efluente de industria que se vaya a tratar y las condiciones de la operación.

5.4 Carbón activo de estudio 1

En el estudio 1[9] se evalúa la eficiencia del carbón activo producido de cáscara de semillas de bhagar en la eliminación del colorante azul básico 9, o también denominado azul de metileno.

El bhagar se utiliza como comida en la India. Es una planta parecida al césped que normalmente crece cerca de los campos de arroz dado que requiere mucha humedad. Se puede encontrar en muchas zonas del mundo.



Fig. 5.4 Planta y semillas de bhagar.

5.4.1 Métodos de preparación del carbón activo

El carbón activo se forma del sustento de un material de base orgánica, en este caso de las semillas de bhagar. Las semillas se lavaron con agua ionizada, secadas y machacas en un procesador de comida hasta ser unas partículas pequeñas de aproximadamente un tamaño de 1-2 mm de grosor.

La mezcla fue impregnada con ZnCl_2 durante 48 horas. Después deshidratada y cocida en un horno a 105 grados centígrados y después carbonizada a 150 grados centígrados durante 12 horas. Para una posterior activación de dicho material durante la exposición de gases de carbono. El material activado finalmente fue enfriado lavado, desionizado y lavado para quitarle químicos restantes.

Se supone que la preparación de este carbón activo se puede realizar de manera industrial, dado que la materia prima de la que proviene se puede encontrar fácilmente.

El carbón activo preparado a través de las semillas presentó que sus grupos funcionales más abundantes fueron el grupo aromático (C-H), ácidos carboxílicos (C-O, C=O y O-H) y carbonilos (C=O).

5.4.2 Experimentación

El experimento fue realizado mediante frascos de 250 mL donde existían unas concentraciones iniciales, C_0 , de 100 mg /L.

Fueron utilizados 0,1 g de carbón activo producido con las semillas, y se mantuvieron en contacto durante 2 horas a una temperatura media de 298 grados kelvin para llegar al equilibrio. El ph de la mezcla fue ajustado a 7 dado que el ph es un dato muy importante a tener en cuenta. El ph es un parámetro que puede variar las curvas de isothermas de Langmuir o de Freundlich y puede incluso llegar a variar sus parámetros.

El ph fue balanceado mediante gotas de disolución de ácido hidrocórico. Finalmente después del tiempo de contacto de 2 horas se retiraron las muestras y se analizó la concentración final del basic blue 9 después y antes de la utilización del carbón activo

5.5 Carbón activo de estudio 2

En el estudio 2[10] se evalúa la eficiencia del carbón activo producido de cáscara periwinkle en la eliminación del colorante basic blue 9, o también denominado azul de metileno.

Las Littorinidae o común mente llamadas periwinkles, es una de las 200 especies de caracoles de mar o moluscos marinos. Estos moluscos poseen unas cáscaras o conchas sumamente duras con una forma alargada y redonda[. Esta especie mide alrededor de unos 4 cm y se encuentran ampliamente en muchas zonas del planeta, especialmente en puertos y en zonas rocosas. Las condiciones en las que pueden vivir estos moluscos son muy amplias, ya que se han adaptado en zonas sumamente cálidas e incluso en zonas pantanosas.



Fig. 5.5 Cáscaras de Periwinkles

5.5.1 Métodos de preparación del carbón activo

El carbón activo se forma del sustento de un material de base orgánica, en este caso de las cáscaras de periwinkle, que es otro tipo de materia prima. Las conchas fueron limpiadas con agua, secadas y posteriormente machacadas hasta unas partículas del tamaño de 1-2 mm.

El material pretratado con nitrógeno fue carbonizado a 700 grados centígrados mediante durante 1 hora. Después se deshidrato la muestra en un horno a 105 grados centígrados. Seguidamente se puso en modo pirolisis a una temperatura final de 850 grados centígrados y así activando sus propiedades durante un tiempo de 2 horas. Una vez se llegó a la temperatura final se mezcló con el dióxido de carbono y la activación mediante pirolisis continuo durante 2 horas. El material activado finalmente fue enfriado lavado, desionizado y lavado para quitarle químicos restantes.

Se supone que la preparación de este carbón activo se puede realizar de manera industrial, dado que la materia prima de la que proviene se puede encontrar fácilmente.

El carbón activo preparado a través de las cáscaras presentó que sus grupos funcionales más abundantes fueron el grupo carboxílico y amina C-O y el siguiente fue el sulfonal S-O y alquilo C-H respectivamente.

5.5.2 Experimentación

El experimento fue realizado mediante frascos de 250 mL donde existían una concentración inicial, C_0 , de 100 mg /L.

Fueron utilizados 0,2 g de carbón activo producido con las semillas, y se mantuvieron en contacto durante 48 horas a una temperatura media de 298 grados kelvin para llegar al equilibrio.

El ph de la mezcla fue ajustado a 7 dado que el ph es un dato muy importante a tener en cuenta. El ph es un parámetro que puede variar las curvas de isotermas de Langmuir o de Freundlich y puede incluso llegar a variar sus parámetros.

El ph fue balanceado mediante gotas de disolución de ácido hidroc্লórico. Finalmente después del tiempo de contacto se retiraron las muestras y se analizó la concentración final del azul básico 9 después y antes de la utilización del carbón activo

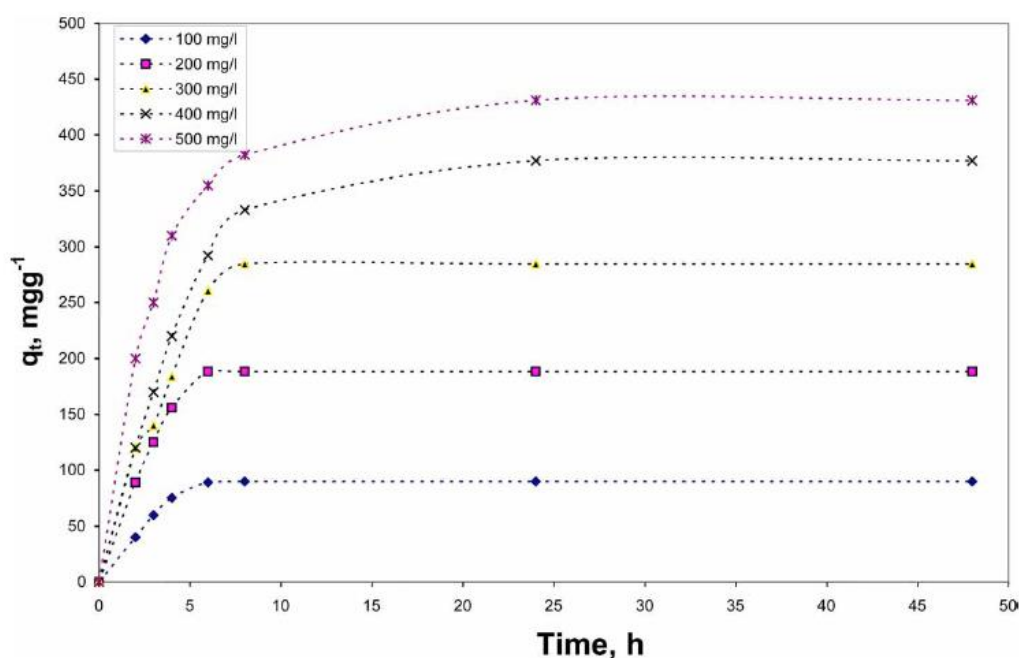


Gráfico 5.5.3 Cinética del carbón activo del estudio 2

6. DISEÑO DEL TRATAMIENTO TERCIARIO

Explicado el caso de estudio en el que se basará el proyecto, sus hipótesis y los tipos de carbonos activos de los estudios 1 y 2, se procederá a realizar el diseño de tratamiento terciario de efluentes de la industria textil para los dos métodos de utilización de carbón activo más comunes, los contactores batch y en columnas o continuos.

Primeramente, se aplicará un diseño mediante contactores batch para cada uno de los tipos de carbón activo con el objetivo de descubrir cuál es el más efectivo, y seguidamente se realizará el mismo procedimiento pero con los contactores en columna o continuos.

Una vez descubierto cuál de los dos tipos de carbón activo es más efectivo, se elegirá el diseño de contactor y de tratamiento terciario definitivo.

6.1 Constantes de las isotermas

La constante a representa la máxima capacidad de adsorción en la isoterma de Langmuir, en el carbón activo comercial, el parámetro a es de 980,3 mg/g para un rango de concentraciones 100 a 400 mg/L[11]. En cambio, en los carbonos activos preparados a través de materias primas naturales, las constantes de adsorción de las isotermas de Langmuir y de Freundlich del colorante basic blue 9 a una temperatura de 298K de los estudios 1 y 2 son:

	Langmuir		Freundlich	
Estudio 1	a	666,7	1/n	0,826
	b	0,00825	$K_f [(mg/g)(1/mg)^{1/n}]$	7,764
	R ²	0,9845	R ²	0,9963
Estudio 2	a	500	1/n	0,8506

	b	0,101	$K_f [(mg/g)(1/mg)^{1/n}]$	26,63
	R^2	0,988	R^2	0,9776

Tabla. 6.1 Constantes de las isothermes de los estudios 1 y 2.

Estos datos fueron extraídos de los artículos antes citados y se puede observar que la capacidad máxima de adsorción es más pequeña.

Todos los casos tienen una R^2 muy parecida a 1, así que se puede confirmar que los parámetros explican de manera acertada los datos experimentales.

6.2 Depósito pulmón

A la hora de diseñar los contactores o el tratamiento terciario, es importante el previo dimensionamiento de un depósito pulmón para que el caudal a la salida de este sea continuo[12] para ambos casos, para el caso de dimensionamiento Batch y el dimensionamiento en columnas.

Según la tipología del efluente del caso de estudio, se tratarán 27 m³/h cuando la planta esté en funcionamiento, que serán 16 horas al día según las hipótesis.

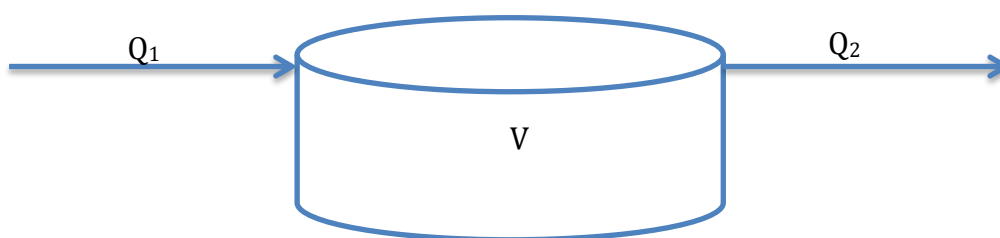


Figura. 6.2 Diseño de un depósito pulmón

$$Q_2 = \frac{t_1 Q_1}{t_2} \quad ; \quad V = t_1 \left(Q_1 - \frac{t_1 Q_1}{t_2} \right) \quad (\text{Ec. 6.2 - 1 y Ec. 6.2 - 2})$$

Donde : t_1 = tiempo de carga Q_1 , h.

t_2 = tiempo de descarga Q_2 , h.

Q_1 = caudal de entrada, m^3 .

Q_2 = caudal de salida, m^3 .

$$Q_2 = \frac{t_1 Q_1}{t_2} = \frac{16 \cdot 27}{24} = 18 \text{ m}^3/h$$

$$V = t_1 \left(Q_1 - \frac{t_1 Q_1}{t_2} \right) = 16 \cdot \left(27 - \frac{16 \cdot 18}{24} \right) = 240 \text{ m}^3$$

Se supondrá a su vez una altura $D/2$ y así se podrán encontrar las dimensiones del tanque:

$$Z = \frac{D}{2}$$

$$V = \frac{D^2 \pi}{4} Z$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot V}{\pi}} = 8,5 \text{ m}$$

Así pues el diámetro del tanque será de 8,5 metros, si se supone una altura de seguridad de 1 metro, se puede encontrar el nuevo volumen del tanque, que será de 298 m^3 .

Una vez calculado el deposito pulmón se procederá a calcular el tratamiento terciario mediante los tipos de carbonos activos mostrados con anterioridad. Se ha decidido proceder mediante los dos tipos de adsorción explicados, adsorción Batch y adsorción en continuo, para posteriormente poder hacer una comparativa y decidir cual es el método de adsorción para el caso de estudio presentado cual es el más adecuado.

6.3 Diseño Batch

Seguidamente del deposito pulmón, se procederá a diseñar el sistema de tratamiento terciario basado en la adsorción de diseño Batch.

6.3.1 Cálculos Batch

Se decidió realizar una hoja de cálculo Excel para poder realizar todos los cálculos necesarios. Primeramente se quiso representar las isothermas de Langmuir de los carbonos activos de los casos 1 y 2 a través de los parámetros presentados. Para ello, se utilizó la ecuación anterior 4.3.4.1 - 1:

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \quad (\text{Ec.4.3.4.1} - 1)$$

Se substituyeron los valores de a y de b por los de la isoterma de Langmuir y se construyó una gráfica dando valores a la variable C_e . Se representaron intervalos de C_e de 0.5 desde el valor 0 hasta el 100.

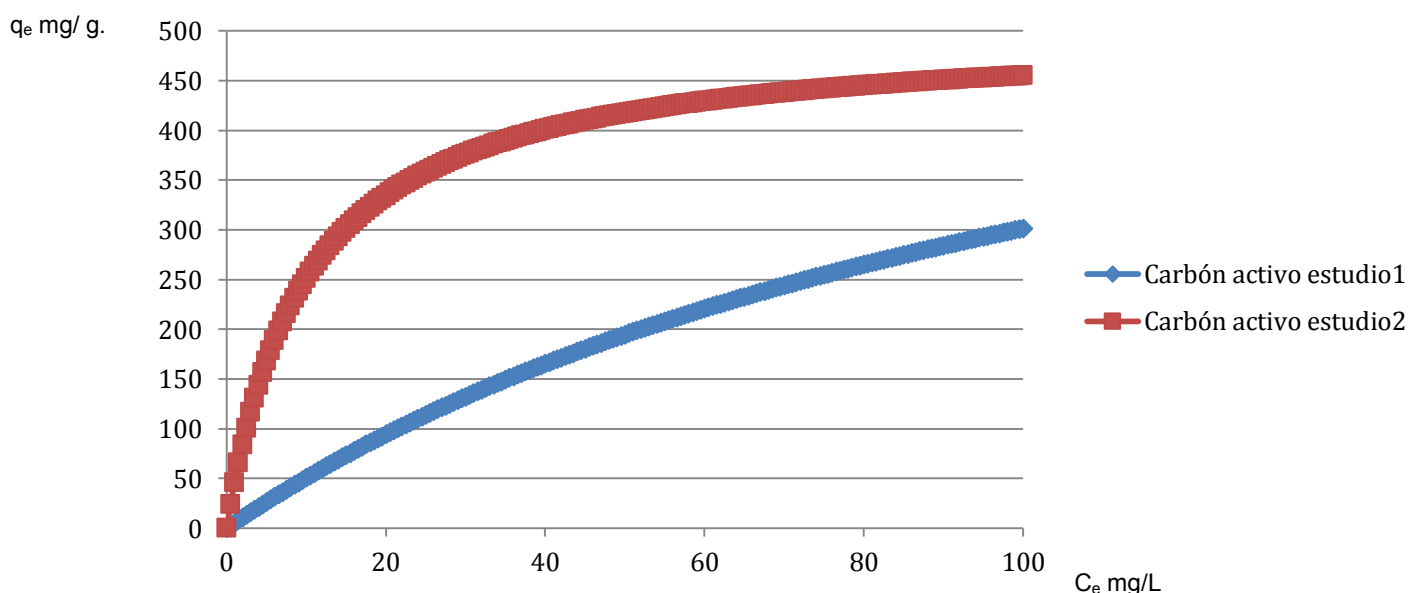


Gráfico. 6.3.1 - 1 Curva de adsorción de los casos 1 y 2.

Se observa que hay diferencias entre las dos curvas de adsorción de Langmuir. La del estudio 1 tiene un crecimiento más gradual aunque su capacidad máxima es de 666,7 mg/g. En cambio, la curva del estudio 2 crece más rápido, pero su capacidad de adsorción máxima es de 500 mg/g.

Una vez representadas las isothermas se quiso representar el punto de equilibrio del caso de estudio. Es decir el punto de la gráfica en el que se encontraba para pasar de una C_0 de 100 mg/L a un C_e de 10 mg/L.

Para ello se utilizó la ecuación:

$$q_e = -\frac{V}{M} (C_e - C_0) \quad (\text{Ec. 4.3.5 - 2})$$

Se mantuvo constante C_0 , dando valores a la variable C_e e igualando con los resultados anteriores de q_e obtenidos con la ecuación 4.4.4.2-1, se obtuvo la incógnita v/m .

El punto unión de la curva de Langmuir y la recta de balance de masa representa el equilibrio de este caso.

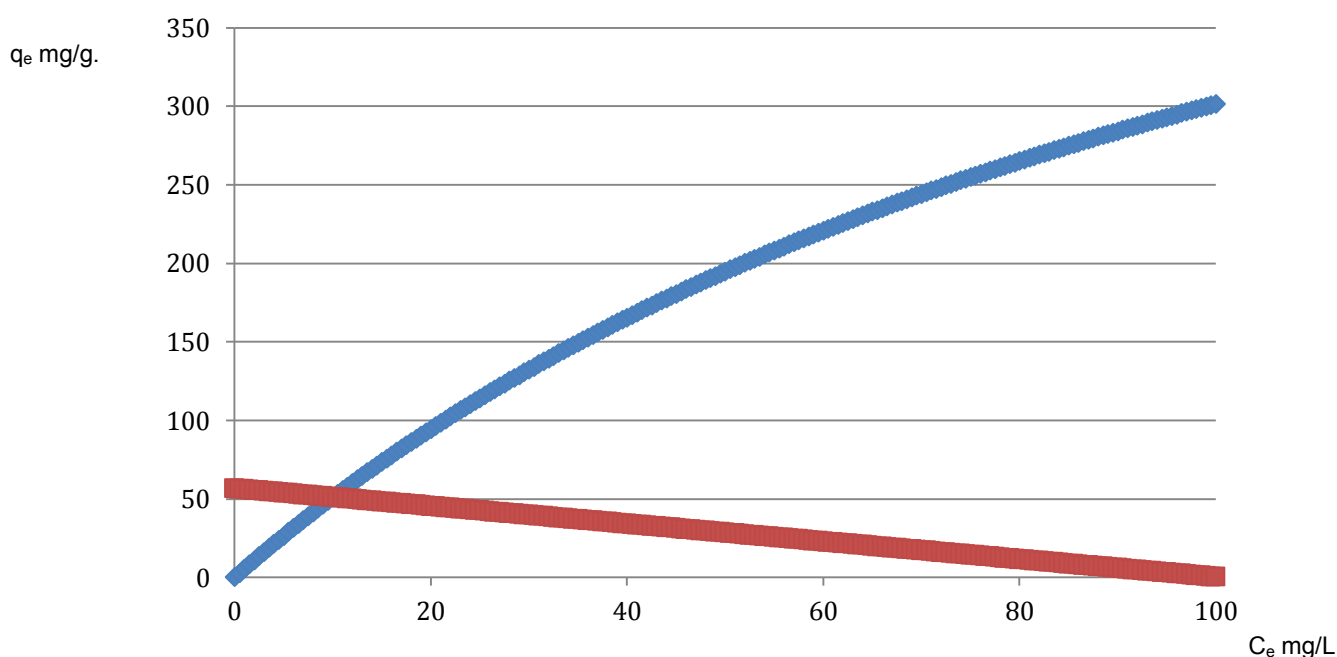


Gráfico. 6.3.1- 2 Curva de adsorción del carbón activo del estudio 1

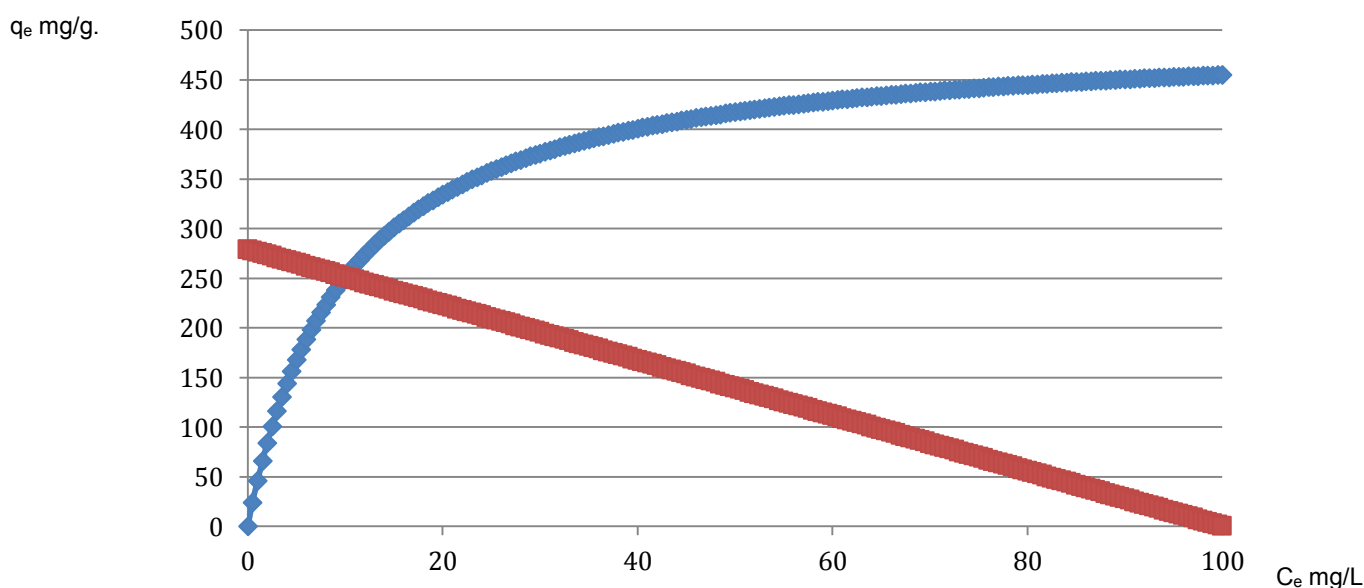


Gráfico. 6.3.1 - 1 Curva de adsorción del carbón activo del estudio 2

El punto equilibrio del carbón activo del estudio 1 es C_e 10 mg/L y q_e 50,81 mg/g, mientras que el punto de equilibrio del tipo de carbón activo 2 es C_e 10 mg /L y q_e 251,24 mg/g.

Se observa que q_e en ambos casos es pequeña en comparación a la capacidad de adsorción máxima que tiene cada uno de los carbonos activos, en el primer caso de 666,7 mg/L y en el segundo caso 500mg/L.

La variable v/m puede ser transformada en la cantidad requerida para tratar el colorante mediante el de agua fijada en el caso de estudio.

Para ello es necesario combinar la ecuación 4.3.4.1 – 1 y la ecuación 4.3.5 – 2, para obtener la expresión de v/m :

$$-\frac{V}{M} (C_e - C_0) = \frac{abC_e}{1+bC_e}$$

$$-\frac{V}{M} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \frac{1}{(C_e - C_0)}$$

Substituyendo los coeficientes de la isoterma para cada uno de los estudios y resolviendo la ecuación:

- Estudio 1

$$-\frac{V}{M} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \frac{1}{(C_e - C_0)} = \frac{666,7 \cdot 0,00825 \cdot 10}{1+0,00825 \cdot 10} \frac{1}{(10-100)} = -0,56456 \text{ L/g}$$

$$\frac{M}{V} = \frac{1}{0,56456} = 1,77 \text{ g/L}$$

- Estudio 2

$$-\frac{V}{M} = \frac{abC_e}{1+bC_e} \frac{1}{(C_e - C_0)} = \frac{500 \cdot 0,101 \cdot 10}{1+0,101 \cdot 10} \frac{1}{(10-100)} = -2,79159 \text{ L/g}$$

$$\frac{M}{V} = \frac{1}{2,79159} = 0,358 \text{ g/L}$$

Determinando la cantidad de carbón activo requerida para tratar 18 m³/h 24 horas al día.

- Estudio 1

$$\text{carbón activo} = \frac{1,77(g/L) \cdot 18(m^3/h) \cdot 24(h/d) \cdot 10^3(L/m^3)}{10^3(g/Kg)} = 765,29 Kg/d$$

- Estudio 2

$$\text{carbón activo} = \frac{0,358(g/L) \cdot 18(m^3/h) \cdot 24(h/d) \cdot 10^3(L/m^3)}{10^3(g/Kg)} = 154,75 Kg/d$$

Se observa que para tratar el mismo caudal y las mismas concentraciones iniciales y finales, el estudio 2 necesita menos cantidad de carbón activo al día.

6.3.2 Diseño de depósito Batch

Para el diseño del depósito Batch se supondrá una hora de carga, diez horas en el equilibrio o tiempo de contacto y otra hora de descarga, para los dos casos de carbón activo especificado en los estudios. Se considera 10 horas de contacto en el depósito Batch por la cinética presentada en el estudio.[10]

En una hora se cargará el tanque, en las diez horas se producirá el contacto con la cantidad requerida de carbón activo para cada uno de los estudios y en la última hora se procederá a su descarga. Si se añaden 1 hora de preparación de material antes de la hora de llenada y una hora al final de la limpieza para imprevistos, el tiempo del ciclo total sería de 14 horas.

- Estudio 1

$$\text{masa de carbón activo} = 765,29 Kg$$

$$\frac{v}{m} = 0,5645 L/g = 0,5645 m^3/Kg$$

$$\text{Volumen del reactor} = 765,29 (Kg) \cdot 0,5645 (m^3/Kg) = 432 m^3$$

- Estudio 2

$$\text{masa de carbón activo} = 154,75 Kg$$

$$\frac{v}{m} = 2,7915 L/g = 2,7915 m^3/Kg$$

$$\text{Volumen del reactor} = 154,75 (Kg) \cdot 2,7915 (m^3/Kg) = 432 m^3$$

Ya que 432 m³ se considera un volumen muy grande y para facilitar las tareas de los operarios, sería beneficioso realizar 2 ciclos.

$$V = \frac{432 \text{ m}^3}{2} = 216 \text{ m}^3$$

El ciclo de operación sería el que se muestra en horas:

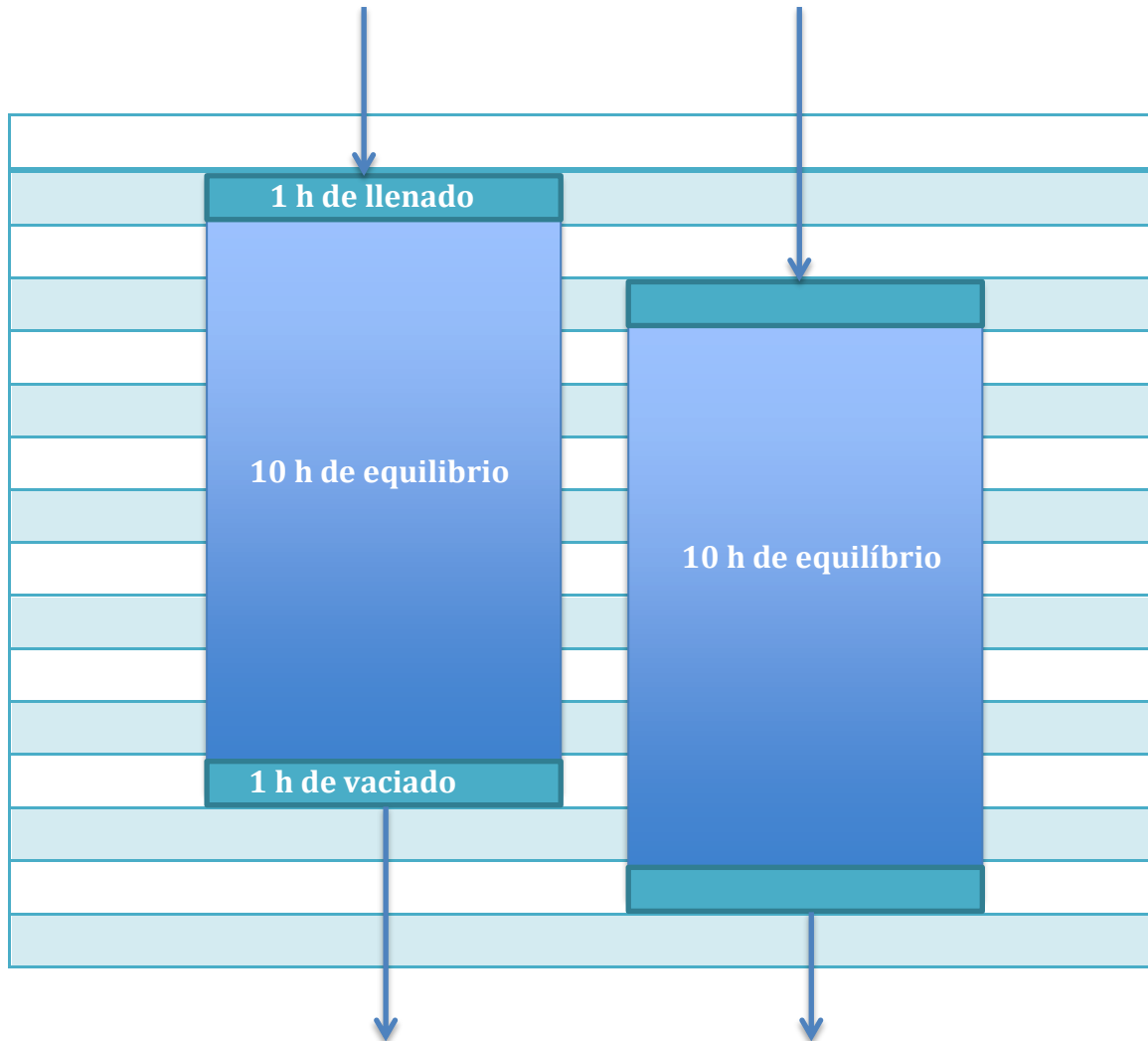


Fig. 6.3.2-1 Diagrama del proceso de adsorción Batch

Se supondrá a su vez una altura de $2D$ y así se podrán encontrar las dimensiones del tanque:

$$Z = 2D$$

$$V = \frac{D^2 \pi}{4} Z$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot V}{\pi}} = 5,16 \text{ m}$$

Así pues el diámetro de cada uno de los contactores será de 5,16 metros, si se supone una altura de seguridad el diámetro final es de 6m. El volumen de cada uno de los contactores es de 340 m³.

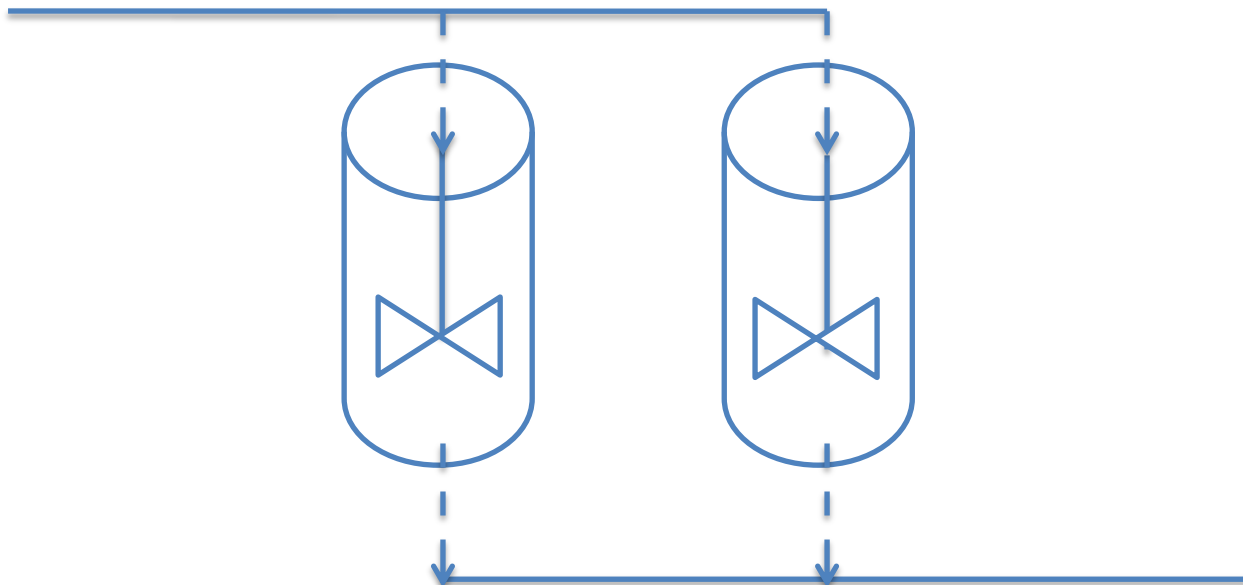


Fig. 6.3.2-2 Proceso de adsorción Batch

Se observa que el volumen de los contactores para los dos casos de estudio es el mismo, y que para tratar el mismo caudal a partir de las mismas concentraciones iniciales y finales, el estudio 2 necesita menos cantidad de carbón activo al día.

Con lo que se decide utilizar para el diseño de contactor tipo Batch el carbón activo procedente del caso de estudio 2.

6.4 Diseño en continuo

Seguidamente del depósito pulmón, se procederá a diseñar el sistema de tratamiento terciario basado en la adsorción de diseño continuo a través de los contactores.

6.4.1 Diseño de contactor en continuo

Se procederá a dimensionar el contactor en continuo. Para ello, se calculó el ratio de carbón activo para tratar el colorante azul de metileno. El carbón activo estimado se calcula con la ecuación 4.3.6.1 - 2 explicada con anterioridad:

$$\frac{m}{Qt} = \frac{C_0 - C_e}{q_e} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1 - 2})$$

El parámetro q_e se substituye por la ecuación 4.4.4.2 -1 de la isoterma de Langmuir, pero substituyendo el factor C_e por C_0 por la formulación del proceso continuo en contactores se encuentra el ratio de carbón activo $\frac{m}{Qt}$.

- Estudio 1

$$\frac{m}{Qt} = \frac{C_0 - C_e}{\frac{abC_0}{1 + bC_0}} = \frac{100 - 10}{\frac{666,7 \cdot 0,00825 \cdot 100}{1 + 0,00825 \cdot 100}} = 0,298621 \text{ g carbón activo/L}$$

- Estudio 2

$$\frac{m}{Qt} = \frac{C_0 - C_e}{\frac{abC_0}{1 + bC_0}} = \frac{100 - 10}{\frac{500 \cdot 0,101 \cdot 100}{1 + 0,101 \cdot 100}} = 0,19782178 \text{ g carbón activo/L}$$

Se considera que la densidad de ambos carbonos activos es de 450 g/L, dado que en los artículos de los casos de estudio 1 y 2 no se menciona su densidad. Así que se optó por utilizar la media del rango de densidades del carbón activo comercial.

Seguidamente, se determina la masa del carbón activo requerido para un tiempo de contacto del lecho en vacío (EBCT) de 10 minutos. Una vez realizados los cálculos para un EBCT de 10 minutos se empezará un proceso iterativo con el fin de encontrar el EBCT más óptimo.

Se recuerda que el caudal continuo proveniente del depósito pulmón a la entrada del contactor es de 18 m³/h, que es igual a 300 L/min.

Para determinar la masa del carbón activo requerido para un EBCT de 10 minutos:

- Estudio 1 y Estudio 2

$$\text{Masa de Carbón activo} = V_b \cdot \rho_{ads}$$

$$\begin{aligned}\text{Masa de Carbón activo} &= 10 \text{ min} \cdot 300 \text{ (L/min)} \cdot 450 \text{ (g/L)} = 1350.000 \text{ g} \\ &= 1.350 \text{ Kg}\end{aligned}$$

El volumen del efluente a tratar con un EBCT de 10 minutos es:

- Estudio 1

$$\begin{aligned}\text{Volumen de efluente tratado} &= \frac{\text{Masa de carbón activo para EBCT}}{\text{Ratio de carbón activo}} \\ &= \frac{1.350.000 \text{ g}}{0,2988621 \text{ g carbón activo/L}} = 4.520.780,52 \text{ L}\end{aligned}$$

- Estudio 2

$$\begin{aligned}\text{Volumen de efluente tratado} &= \frac{\text{Masa de carbón activo para EBCT}}{\text{Ratio de carbón activo}} \\ &= \frac{1.350.000 \text{ g}}{0,19782178 \text{ g carbón activo/L}} = 6.824.324,39 \text{ L}\end{aligned}$$

Finalmente para determinar el tiempo de residencia:

- Estudio 1

$$\begin{aligned}\text{Bed life} &= \frac{\text{Volumen de agua tratada para el EBCT}}{Q} = \frac{4.520.780,52 \text{ L}}{300 \text{ L/min} \cdot 1440 \text{ min/d}} \\ &= 10,46 \text{ días}\end{aligned}$$

- Estudio 2

$$\begin{aligned}\text{Bed life} &= \frac{\text{Volumen de agua tratada para el EBCT}}{Q} = \frac{6.824.324,399 \text{ L}}{300 \text{ L/min} \cdot 1440 \text{ min/d}} \\ &= 15,79 \text{ días}\end{aligned}$$

Para calcular el volumen del contactor, solo es necesario calcularlo mediante la cantidad de carbón activo y su densidad:

$$\rho_{ads} = \frac{m_{ads}}{V_{ads}} \quad V_{ads} = \frac{m_{ads}}{\rho_{ads}} = \frac{1.350.000 \text{ g}}{450 \text{ g/L}} = 3000L = 3 \text{ m}^3$$

$$EBCT = \frac{3 \text{ m}^3}{18 \text{ m}^3/h} = 0,16667 \text{ h} = 10 \text{ min}$$

Efectivamente da el resultado anterior de 10 minutos de tiempo de contacto de lecho en vacío.

Según los valores típicos de diseño de contactores en continuo de carbón activo[4]:

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Volumen del contactor	V	m ³	10-50
EBCT	EBCT	min	5-30

Tabla. 6.4.1-1 Tabla de valores típicos de diseño

Como se puede apreciar por los cálculos anteriores, el volumen del contactor no está dentro de los límites establecidos. Así pues, se decidió empezar un proceso iterativo en una hoja de Excel para intentar establecer tanto el EBCT y el volumen del contactor dentro de los parámetros

Se observa que el caudal es constante debido al depósito pulmón y por consecuencia la relación existente entre el volumen del contactor y el ECBT siempre será la misma 0,3.

Una vez realizados los cálculos pertinentes, se llegó a la conclusión de que debido a la relación existente entre los parámetros, nunca se conseguiría que ambos llegasen a estar comprendidos entro los valores pertinentes. Así que se decidió exponer el que más se ajustaba mediante el proceso de iteración ajustando el V para conseguir el tiempo.

$$EBCT = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1} - 4)$$

$$EBCT = \frac{9,5 \text{ m}^3}{18 \text{ m}^3/h} = 0,527778h = 31 \text{ min y } 40 \text{ segundos}$$

$$\rho_{ca} = \frac{m_{ca}}{V_{ca}} \quad m_{ca} = V_{ca} \cdot \rho_{ca} = 9500 \text{ L} \cdot 450 \text{ g/L} = 4.275.000 \text{ g} = 4.275 \text{ Kg}$$

En este caso el EBCT es de 32 minutos, que es muy próximo al rango de parámetros explicados con anterioridad y el volumen del contactor es de 9,5m³, también muy próximo. La masa de carbón activo es de 4.275 Kg.

El volumen de efluente tratado durante los 32 minutos es:

- Estudio 1

$$\begin{aligned} \text{Volumen de efluente tratado} &= \frac{\text{Masa de carbón activo para EBCT}}{\text{Ratio de carbón activo}} \\ &= \frac{4.275.000 \text{ g}}{0,298621 \text{ g carbón activo/L}} = 14.315.784,25 \text{ L} \end{aligned}$$

- Estudio 2

$$\begin{aligned} \text{Volumen de efluente tratado} &= \frac{\text{Masa de carbón activo para EBCT}}{\text{Ratio de carbón activo}} \\ &= \frac{4.275.000 \text{ g}}{0,19782178 \text{ g carbón activo/L}} = 21.610.360,36 \text{ L} \end{aligned}$$

Finalmente para determinar el tiempo de residencia:

- Estudio 1

$$\begin{aligned} \text{Bed life} &= \frac{\text{Volumen de agua tratada para el EBCT}}{Q} = \frac{14.315.784,25 \text{ L}}{300 \text{ L/min} \cdot 1440 \text{ min/d}} \\ &= 33,13 \text{ días} \end{aligned}$$

- Estudio 2

$$\begin{aligned} \text{Bed life} &= \frac{\text{Volumen de agua tratada para el EBCT}}{Q} = \frac{21.610.360,36 \text{ L}}{300 \text{ L/min} \cdot 1440 \text{ min/d}} \\ &= 50 \text{ días} \end{aligned}$$

Para que los dos tipos de contactores fuesen similares y se pudieran comparar a posterior mejor, se decidió poner 2 contactores en continuo en paralelo dividiendo los $9,5 \text{ m}^3$ entre dos. Esto no afecta para nada los cálculos realizados con anterioridad, puesto que el caudal que les entra es la mitad y por consiguiente sigue siendo el mismo EBCT y la masa de carbón activo a utilizar es la misma.

Se supondrá a su vez una altura de $2D$ y así se podrán encontrar las dimensiones del tanque:

$$Z = 2D$$

$$V = \frac{D^2 \pi}{4} Z$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot V}{\pi}} = 1,5 \text{ m}$$

Así pues el diámetro del contactores será de 1,82 metros, si se supone una altura de seguridad de un metro, el diámetro final es de 2,5 m. El volumen de cada uno de los contactores es de $24,54 \text{ m}^3$.

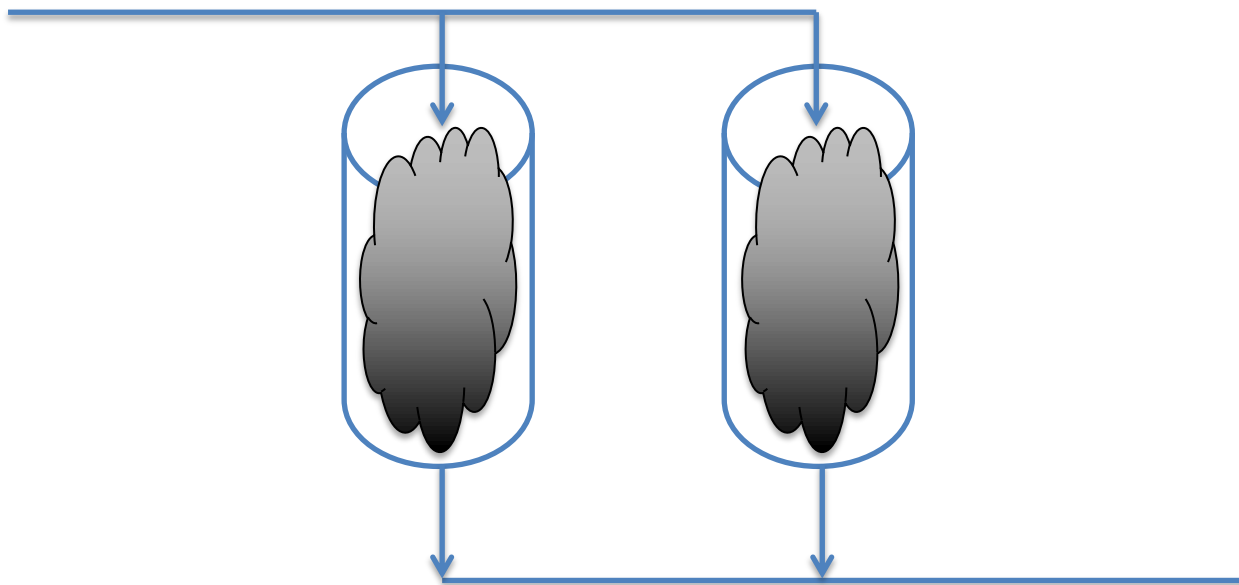


Fig. 6.4.1-1 Proceso de adsorción en continuo

Para el caso de estudio 1 el tiempo de residencia es de 33 días, mientras que en el caso de estudio 2 el tiempo de residencia es de 50 días. Se puede afirmar que el carbón activo explicado en el caso de estudio 2 es mejor para el contactor en continuo,

dado que para la misma cantidad de carbón activo, en el caso de estudio 2 durará más días y supondrá menos coste de carbón activo.

En el primer caso se tendría que hacer una reposición del adsorbente 1 vez al mes, gastando al año 51.300 Kg de carbón activo. Mientras que para el segundo caso una cantidad de 29.925 Kg al año sería suficiente. Hay que tener en cuenta que el recambio del carbón activo supondría un tiempo de inactividad, con lo que es preferible cambiar el carbón activo el menor de veces posible.

Con lo que se decide utilizar para el diseño de contactor tipo continuo el carbón activo procedente del caso de estudio 2.

6.5 Comparación de ambos modelos y ambos casos de estudio

Una vez comparados los dos casos de estudio para los contactores Batch y para los contactores en columnas o continuo, se procede a realizar una comparativa de clara de entre ellos.

En relación a los contactores tipo Batch se puede observar que en el caso de estudio 1 se necesita más cantidad de adsorbente que en el caso de estudio 2 para tratar el mismo colorante, el mismo caudal y las mismas concentraciones iniciales y finales. Con lo que es más rentable el caso de estudio 2, dado que el volumen del contactor es el mismo que para el caso 1 y se necesita menos cantidad de adsorbente.

A continuación, en relación a los contactores continuos o en columna, se observa que para una misma cantidad de adsorbente, en el caso de estudio 1 el tiempo de residencia es más pequeño que en el caso de estudio 2. El caso de estudio 1 supondría una recarga más veces al año y por lo tanto más cantidad de adsorbente. En este caso también es más beneficioso el caso de estudio 2.

Tipo de carbón activo según el caso de estudio	1	2
Batch	765,29 Kg/día	154,75 Kg/día
Continuo	33,13 días	50 días

Fig. 6.5-1 Tabla comparativa

Seguidamente, una vez concluido que el adsorbente procedente del caso de estudio realizado con la materia prima de cáscara de molusco Periwinkle ofrece más beneficios que el adsorbente realizado con semillas de Bhagar, es necesario saber cuál de los dos tipos de contactores ofrece mejores resultados y cuál es el diseño definitivo del tratamiento terciario del efluente basado en la adsorción de colorantes.

Si se comparan los resultados obtenidos en ambos contactores, se observa que en el contactor Batch se necesitan más Kg por día que en el caso del contactor en columna. Además es necesario recalcar que los contactores tipo Batch no funcionan todo el día, dado que se necesita mano de obra para cargar y descargar los tanques, mientras que los contactores tipo columna o continuos funcionan 24 h y solo están inactivos en el momento en el que es necesario cambiar el carbón activo cuando su tiempo de residencia ha finalizado. En el caso de Batch se utilizan 154,75 Kg de adsorbente al día, en cambio en los contactores continuos se utilizan 4.275 Kg de adsorbente cada 50 días. Se harían 7 recambios al año y si suponemos que este recambio de carbón activo durase 3 días, esto supondría 87 Kg de adsorbente al día. Claramente los contactores de tipo continuos son más beneficiosos.

Contactor	Batch	Continuo
Carbón activo procedente del estudio 2	154,75 Kg/día	87 Kg/día

Fig. 6.5-2 Tabla comparativa

6.6 Modelo competitivo para contactores continuos

Una vez seleccionado el caso de estudio 2 y el contactor tipo continuo, se decide realizar un modelo competitivo y estudiar cómo influye otro colorante en los resultados obtenidos.

Para que los resultados fuesen lógicos, no se introdujo un colorante con sus constantes de Langmuir y Freundlich, dado que esos parámetros estarían calculados a partir del carbón activo comercial y no el carbón activo del caso de estudio 2, hecho a través de materia prima de bajo coste de cáscaras de molusco.

Así que se procedió a calcular el modelo competitivo a través de relaciones entre los parámetros que se encontrasen en las ecuaciones y ver en función de estos como variaban las características del contactor.

Para calcular como afecta el modelo competitivo al contactor tipo continuo se procede de la misma manera con la ecuación 4.3.6.1 – 2.

$$\frac{m}{Q_t} = \frac{C_0 - C_e}{q_e} \quad (\text{Ec. 4.3.6.1 – 2})$$

Simplemente se tiene que introducir la ecuación 4.3.4.3 -1 del modelo competitivo en la q_e .

$$q_{e1} = \frac{a_1 b_1 C_{e1}}{1 + b_1 C_{e1} + b_2 C_{e2}} \quad (\text{Ec. 4.3.4.3 – 1})$$

Uniendo ambas formulas se obtiene:

$$\frac{m}{Q_t} = \frac{C_{01} - C_{e1}}{\frac{a_1 b_1 C_{e1}}{1 + b_1 C_{e1} + b_2 C_{e2}}}$$

Con el modelo competitivo en contactor continuo no se pretendía calcular valores exactos, así pues no fue necesario resolver el sistema de ecuaciones planteadas en el modelo competitivo, simplemente comparar los diferentes valores mostrados a través de relaciones.

Los subíndices de 1 se refieren a las constantes de la isoterma de Langmuir del colorante azul de metileno en el carbón activo del caso de estudio 2 y las concentraciones iniciales y finales presentadas en el caso de estudio del efluente. Mientras que los subíndices 2 se refiere a la constante de la isoterma de Langmuir de otro colorante en el carbón activo del estudio 2 y a su concentración inicial, ambas desconocidas.

$$\frac{m}{Q_t} = \frac{C_{01} - C_{e1}}{\frac{1}{\frac{1}{a_1 b_1 C_{01}} + \frac{b_1 C_{01}}{a_1 b_1 C_{01}} + \frac{b_2 C_{02}}{a_1 b_1 C_{01}}}}$$

A partir de la ecuación 6.5 – 2, se observa que no es necesario tener unos parámetros claros de b_2 y C_{02} para saber su evolución, simplemente dando valores a la relación que puede existir entre b_2/b_1 y C_{02}/C_{01} puede conocer la evolución y como afectara esto al diseño del contactor y a su tiempo de residencia.

La masa de carbón activo es la misma que en el caso de contactor continuo sin competencia, dado que se considera el mismo EBCT y el mismo volumen de contactor. Se recuerda EBCT 32 min y masa de carbón activo 4.275 Kg.

Se consideraron a estudiar parámetros de b_2/b_1 entre [0-2] y C_{02}/C_{01} [0-1]. Los cálculos se realizaron en una hoja de Excel.

Primeramente se estudio como afectaban estos parámetros al ratio de carbón, ya que es un parámetro que afecta al volumen de efluente tratado y por consiguiente al tiempo de residencia.

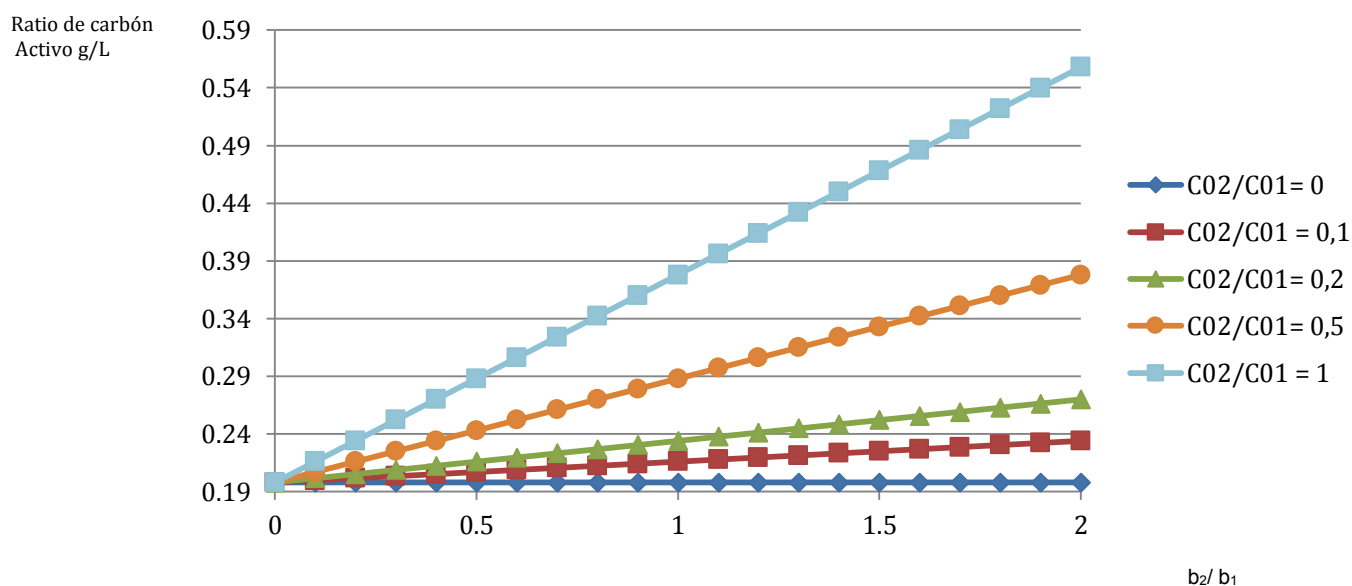


Gráfico. 6.6- 1 Curva que muestra la evolución del ratio de carbón activo en función de b_2/b_1 y C_{02}/C_{01} .

Para realizar esta gráfica se han tenido en cuenta la relación existente entre las dos relaciones presentadas con anterioridad. Cada una de las líneas representa un valor de C_{02}/C_{01} y cada uno de los puntos un valor de b_2/b_1 diferente. Primero se observa que a medida que la concentración inicial del componente 2 va creciendo, también

crece el ratio de carbón activo, al igual que para una misma relación de concentración inicial de C_{02}/C_{01} si crece la relación de b_2/b_1 también aumenta el ratio de carbón activo.

Se puntualiza que para una relación de concentraciones iniciales de $C_{02}/C_{01} = 0$ y una relación de constantes de isoterma $b_2/b_1 = 0$, que es como si el segundo colorante no existiera, el ratio de carbón activo es el mismo que en el diseño del contactor en continuo del caso de estudio 2, 0,1978 g/L.

Una vez estudiado como afecta el ratio de carbón activo y realizados los cálculos pertinentes en el Excel para cada una de las relaciones de concentraciones iniciales con interacción de cada una de las relaciones de los componentes de la isoterma de Langmuir, se procede a hacer los cálculos para el volumen de agua tratado y finalmente ver como afecta al tiempo de residencia.

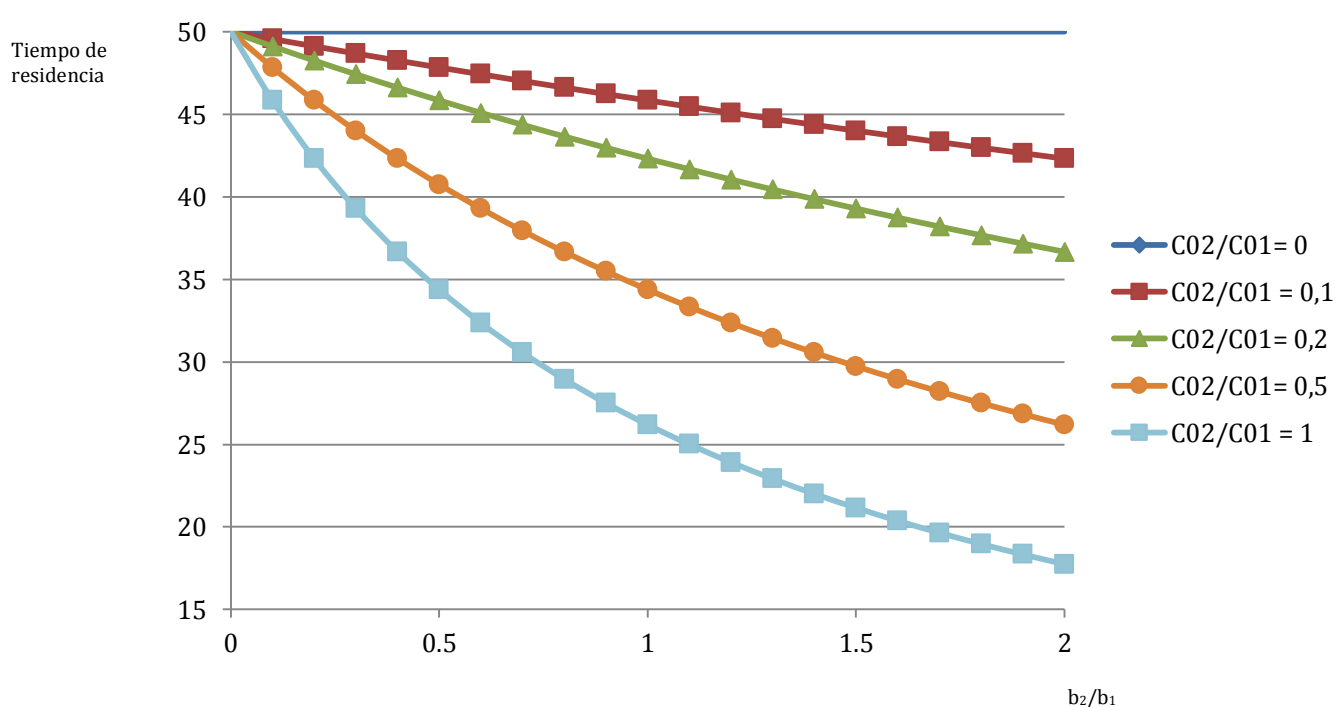


Gráfico. 6.6- 2 Curva que muestra la evolución del tiempo de residencia en función de b_2/b_1 y C_{02}/C_{01} .

En este gráfico, cada una de las líneas representa un valor de C_{02}/C_{01} y cada uno de los puntos un valor de b_2/b_1 diferente. Se observa que a medida que la concentración inicial del componente desconocido 2 va creciendo disminuye el tiempo de residencia. También se observa que a medida que se va aumentando la relación entre b_2/b_1 el tiempo de residencia también disminuye.

Se puntualiza que para una relación de concentraciones iniciales de $C_{02}/C_{01} = 0$ y una relación de constantes de isothermas $b_2/b_1 = 0$, que es como si el segundo colorante no existiera, el tiempo de residencia es el mismo que en el diseño del contactor en continuo del caso de estudio 2, 50 días.

Se extrae de esta última gráfica que añadir un segundo colorante al carbón activo no es beneficioso, ya que en todos los casos disminuiría el tiempo de residencia, y se tendría que cambiar el carbón activo de los contactores continuos más a menudo, con lo que habría un gasto mayor.

Según el gráfico 6.6 -2, si se añadiese al caso de estudio un colorante externo con una concentración inicial de 50 mg/L ($C_{02}/C_{01} = 0,5$) y con un parámetro b igual que el del carbón activo del caso de estudio 2 ($b_2/b_1 = 1$), el tiempo de residencia para el mismo contactor en continuo sería de 35 días.

7. PLANIFICACIÓN Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

A continuación se detalla la planificación i los costes que han comportado la realización del proyecto. Los costes se han desglosado según los bienes materiales adquiridos o consumidos y la valoración económica de los recursos humanos que han sido necesarios para su realización. El coste de los materiales mencionados se les añadirá los costes indirectos correspondientes al impuesto sobre el valor añadido (I.V.A). Para los recursos humanos, el coste por hora ya contempla los impuestos directos aplicados.

7.1 Cronograma de actividades del proyecto

Se considera un total de 5 meses para el desarrollo del proyecto. La dedicación ha sido de aproximadamente 15 horas a la semana, que hace un total de 300 horas para su realización.

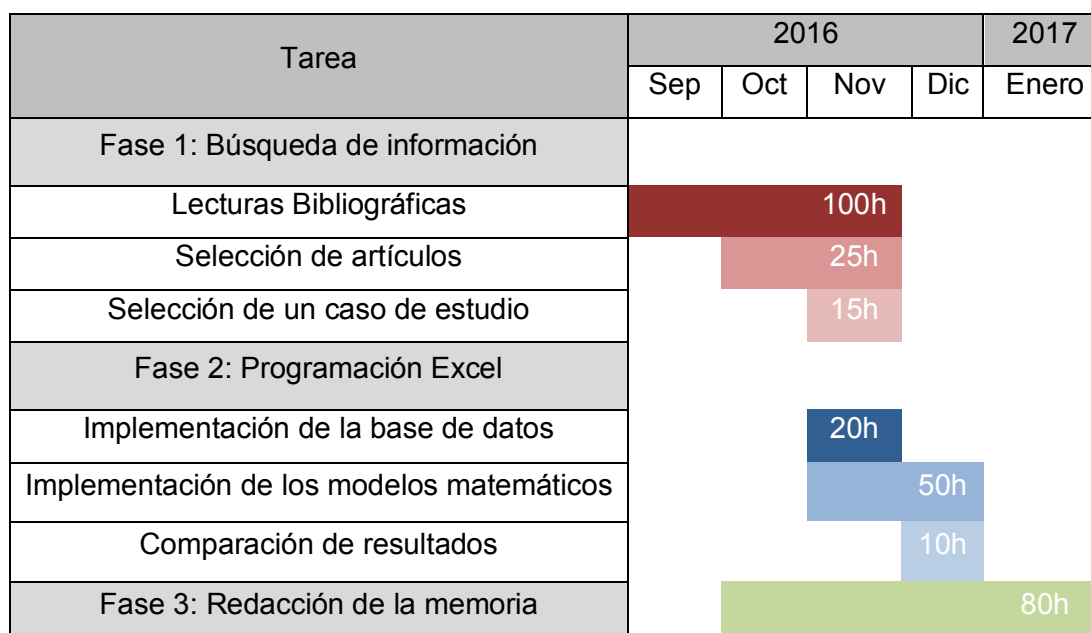


Tabla 7.1 Diagrama de tareas

7.2 Bienes materiales

Se ha considerado el coste del ordenador portátil adquirido (importe que contiene la licencia del sistema operativo *Microsoft® Windows* y la herramienta *Microsoft® - Office*

2014 y los dispositivos complementarios como el ratón), una calculadora y consumibles (papel, tinta, utensilios estilográficos y un memoria USB).

Material	Precio
Ordenador	600,00€
Calculadora	12,00€
Consumibles	30,00 €
TOTAL	642,00€

Tabla 7.2 Bienes materiales

7.3 Recursos humanos

En referencia al personal, se contemplan las horas de dedicación del encargado de la realización del proyecto. Se considera un coste de 12 €/h para el titulado en el grado de ingeniería industrial para el desarrollo del proyecto.

Concepto	Coste/hora	Horas dedicadas	COSTE TOTAL
Titulado en grado de ingeniería industrial	12,00 €/h	300	3.600,00 €

Tabla 7.3 Recursos humanos

7.4 Costes totales

Para finalizar, el coste total, que comprende la suma de los costes mencionados anteriormente. Se considera que para el proyecto realizado el coste indirecto supone un 25% del coste total.

Concepto	Coste
Bienes materiales	642,00 €
Recursos humanos	3.600,00 €
SUBTOTAL	4.242 €
Costes indirectos	1.060,50€
TOTAL	5.305,50€

Tabla 7.4 Costes totales

8. CONCLUSIONES

En este proyecto se ha llevado a cabo satisfactoriamente el diseño de un tratamiento terciario de efluentes de la industria textil basado en la adsorción de colorantes. A partir del caso de estudio, se ha diseñado el proceso de adsorción más adecuado para este.

Una vez presentado el caso de estudio con el colorante azul de metileno y los dos tipos de carbonos activos que se van a estudiar para los contactores Batch, se observa que aunque la capacidad de adsorción máxima del caso de estudio 1 es mayor que la del caso de estudio 2, este último presenta mejores resultados frente al caso de estudio, dado que es capaz de adsorber igual con menos cantidad de adsorbente.

En continuo, una vez realizado el proceso iterativo para encontrar las condiciones más optimas para los contactores, se observa que el tiempo de residencia en el caso de estudio 1 es menor al tiempo de residencia que en el caso de estudio 2 para una misma masa de carbón activo.

El proyecto presenta que el carbón activo producido a través de materia prima de cascara de molusco, puede ser efectivo usado como materia prima para la preparación del carbón activo para la eliminación de azul de metileno.

A la hora de seleccionar el diseño Batch o el diseño continuo para el tratamiento terciario final, se concluyó que el diseño en continuo presentaba mayores beneficios, no solo por la cantidad de carbón activo al día menor, sino también porque los recursos utilizados al día son menores.

A la hora de estudiar la competencia del azul de metileno frente a otro colorante en continuo utilizando el carbón activo del caso de estudio 2, se observa que en todos los casos en los que se incluye una concentración de colorante con una relación entre sus parámetro b, el tiempo de residencia del azul de metileno disminuirá con lo que se utilizaría una cantidad superior de carbón activo.

9. AGRADECIMIENTOS

A Vicenç Martí, por su paciencia y ayudarme en todo momento.

A mis compañeros y jefe de Schneider Electric, por transmitirme las ganas de seguir aprendiendo.

A Ana Bueno, por no dejar que me rindiese.

A mis padres y mi hermano, por su apoyo y amor incondicional.

10. BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- [1] Lu, X., Liu, L., Liu, R. y Chen, J. (2010). Textile wastewater reuse as an alternative water source for dyeing and finishing processes: A case study. *Desalination* 258, 229-232.
- [2] Jin, X.C., Liu, G.Q., Xu, Z.H. y Tao, W.Y. (2007). Decolorization of a dye industry effluent by *Aspergillus fumigatus* XC6. *Applied Microbiology and Biotechnology* 74, 239-243.
- [3] Dolís, M., Gil, J. L., Pérez, H. I., Manjarrez, N., Perdomo, M. (2013) The sedimentation process a simple method to diminish contaminants in textile effluents. *Rev. Mexicana de Ingeniería Química*, 12, 3, 585-594.
- [4] METCALF & EDDY, Wastewater Engineering, treatment and resource recovery. (Fifth Edition-Volume 2). McGraw-Hill, 2014. Capítulo 11.
- [5] TAYLOR & FRANCIS, Activated carbon adsorption. Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- [6] K.K.H. Choy, J.F. Porter, G. McKay, Langmuir isotherm models applied to the multicomponent sorption of acid dyes from effluent onto activated carbon, *Journal of Chemical & Engineering Data*. 45 (2000) 575–584.
- [7] G. Mezohegyi, F.P. van der Zee, J. Font, A. Fortuny, A. Fabregat, J. Environ. Manage. 102 (2012) 148–164.
- [8] Vimonses, V., Jin, B., Chow, C.W.K., *J. Hazard. Mater.*, 177 (2010) 420.
- [9] Kailas Mahadeo Doke, Amol Chavan, Rajendra Nalawade, Ejazuddin M. Khan. Kinetics and Equilibrium Isotherm for adsorption of Basic Blue 9 dye onto Activated Carbon prepared from Bhagar Seed Husk. Nov 2012 374-383.
- [10] Bello, O.S., Adeogun, I.A., Ajaolu, J.C., Fehintola, E.O., *Chem. Ecol.*, 24 (2008) 285-295.

[11] V.K. Gupta, Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal. Journal of Environmental Management 90 (2009) 2313–2342.

[12] DEPARTAMENT D'ENGINYERIA QUÍMICA, Tecnologia del medi ambient i sostenibilitat, Transparències. Curs 2013-2014.

Recursos web

[13] UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
<<https://www.uaeh.edu.mx/>>

[14] MEDIOAMBIENTALES < <http://medioambientales.com/>>

[15] GREENPEACE < <http://www.greenpeace.org/>>